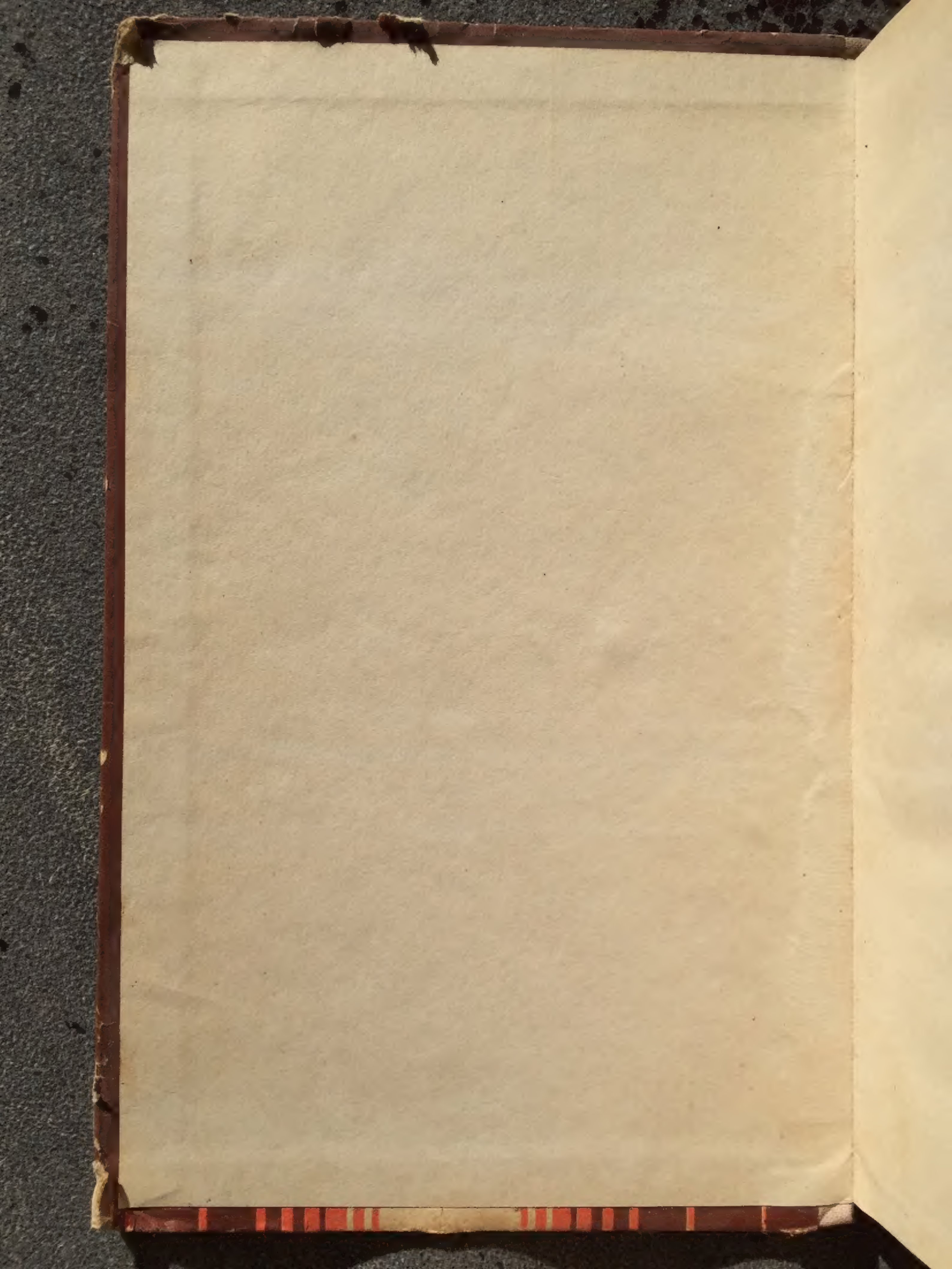
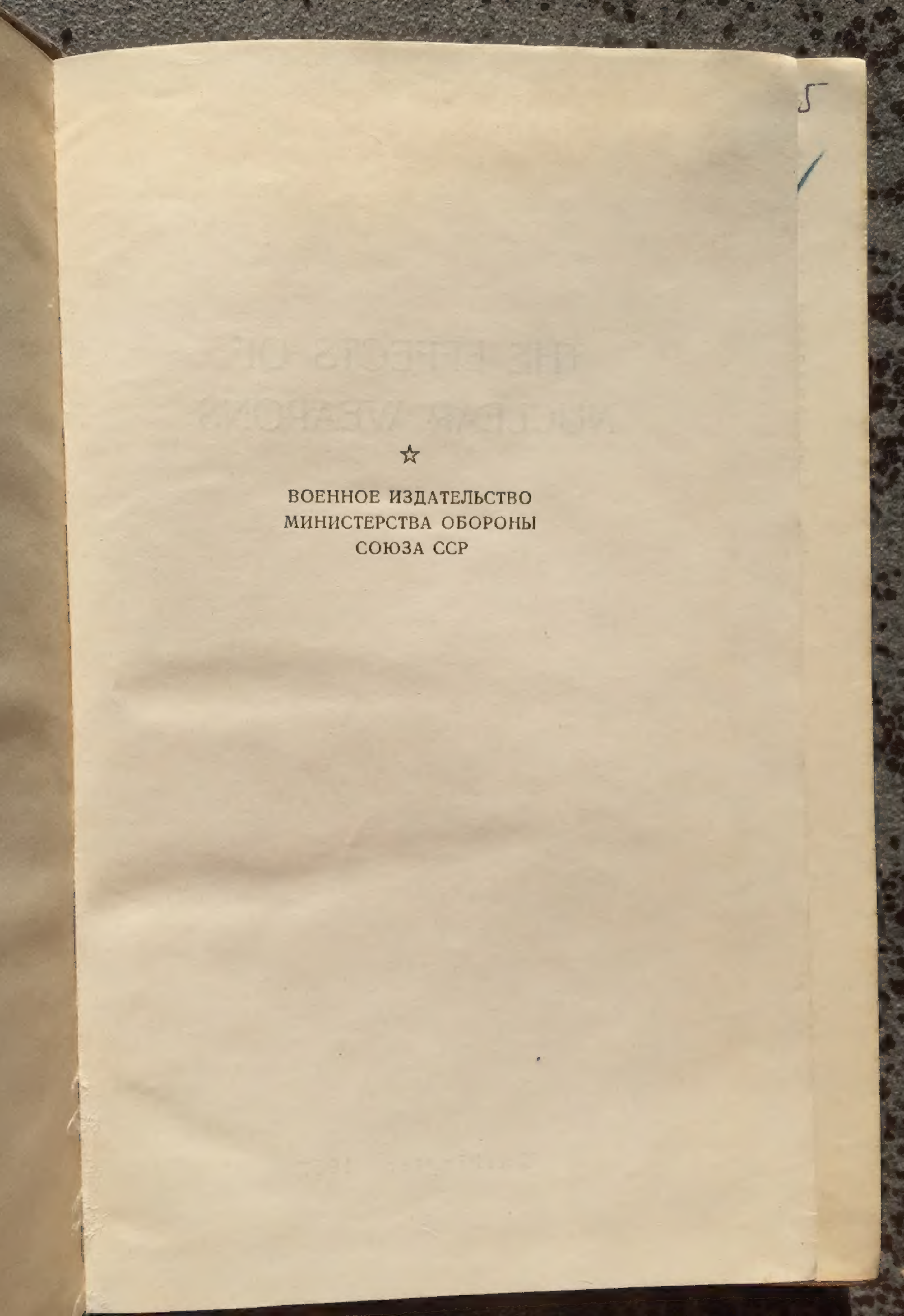
ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ





☆

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ
СОЮЗА ССР

THE EFFECTS OF NUCLEAR WEAPONS

Washington—1957

ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Перевод с английского

Под редакцией
кандидата физико-математических наук
Бурлакова В. Д. и Тулинова Н. Н.

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА—1960

ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

(Перевод с английского)

Книга подготовлена министерством обороны США и издана комиссией по атомной энергии. Она содержит последние данные по действию ядерного оружия, которые были получены в результате проведения опытных взрывов, теоретических исследований и изучения последствий взрывов атомных бомб в Хиросима и Нагасаки.

В книге подробно рассматриваются физические процессы, происходящие при ядерном взрыве, явления, сопровождающие взрыв, и дается классификация взрывов; излагаются вопросы, связанные с действиями каждого поражающего фактора ядерного взрыва, с установлением математических зависимостей, позволяющих производить расчеты его параметров; дается описание разрушений объектов, вызываемых действием ударной волны взрыва, и указываются методы расчета различных сооружений на действие ударных нагрузок; рассматривается действие ядерного взрыва на людей и даются основные положения по организации противоатомной защиты.

Книга рассчитана на читателей, интересующихся вопросами действия ядерного оружия.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ

ОСОБЕННОСТИ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Введение

I.1. Вообще взрыв представляет собой выделение в ограниченном пространстве большого количества энергии за короткий промежуток времени. Освобождение энергии при взрыве сопровождается значительным повышением температуры, поэтому продукты взрыва превращаются в сильно нагретые газы. Эти газы, обладая весьма высокой температурой и давлением, быстро расширяются; расширяясь, они с большой силой воздействуют на окружающую среду, т. е. воздух, воду или грунт, в результате чего образуются ударная волна или волна сжатия, являющиеся основными разрушающими факторами взрыва. Термин **ударная волна** обычно употребляют для описания явлений, происходящих при взрыве в воздухе; действие ударной волны в воздушной среде напоминает действие очень сильного ветра (при взрыве он действительно образуется). При взрыве в воде или грунте разрушающий фактор называют **волной сжатия** [1], так как он действует в этом случае как внезапный толчок или удар.

I.2. Атомная (или ядерная) [2] бомба сходна с бомбой обычного типа (т. е. с бомбой с обычным взрывчатым веществом) в том отношении, что ее разрушающее действие обусловлено главным образом действием ударной волны или волны сжатия. Однако, помимо того, что ядерные бомбы могут быть во много раз более мощными, чем самые крупные бомбы, снаряженные тротилом, между этими двумя типами бомб имеются и другие существенные различия. Во-первых, при ядерном взрыве значительная часть

---

[1] В терминологии, употребляющейся в советской специальной литературе, волной сжатия принято называть волну, возникающую только при подземном взрыве; при подводном взрыве образуется подводная ударная волна. (*Прим. ред.*)

[2] Как будет видно в дальнейшем (см. § I.9), термины «атомный» и «ядерный» могут применяться как синонимы, когда речь идет об оружии или взрывах.

энергии, обычно называемая световым излучением, выделяется в виде света и тепла. Световое излучение способно вызывать ожоги на коже или воспламенять возгораемые материалы на значительном расстоянии от места взрыва. Во-вторых, ядерный взрыв сопровождается испусканием вредных невидимых лучей, обладающих высокой проникающей способностью и называемых **начальной ядерной радиацией**[1]. Наконец, вещества, оставшиеся после ядерного взрыва, являются радиоактивными, т. е. в течение длительного времени испускают вредное излучение; это излучение принято называть **остаточной ядерной радиацией** или остаточной радиоактивностью (рис. I.2).

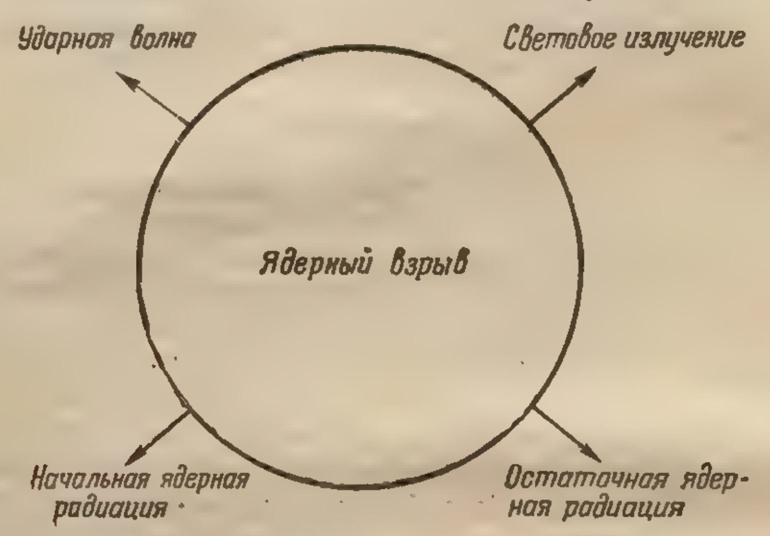


Рис. I.2. Поражающие факторы ядерного взрыва

I.3. Именно потому, что между ядерным взрывом и взрывом обычного взрывчатого вещества (тротила) существует коренное качественное отличие, а также потому, что ядерный взрыв обладает несравнимо большей мощностью, действие ядерного оружия должно быть рассмотрено особо. В связи с этим важное значение имеет знание и понимание механических и физических процессов, связанных с ядерным взрывом.

I.4. Цель настоящей книги состоит в том, чтобы установить закономерности, связанные с действием ядерного оружия, и дать объективный анализ этих закономерностей. Авторы книги надеются, что содержащиеся в ней сведения помогут лицам, ответственным за планирование оборонных мероприятий, в решении трудных проблем, которые могут возникнуть в случае атомной войны. Кроме того, данные, приведенные в книге, могут быть использованы архитекторами и строителями при проектиро-

[1] В советской специальной литературе принят термин «проникающая радиация». (*Прим. ред.*)

вании сооружений, обладающих повышенной устойчивостью против разрушающего действия ядерного взрыва и пожаров, а также способностью защищать от ядерной радиации.

Строение атомов и изотопы

1.5. Всякое вещество состоит из одной или нескольких простых составных частей, называемых **элементами**; общее число элементов — около девяноста. К наиболее известным элементам относятся: газы — водород, кислород и азот; твердые неметаллы — углерод, сера и фосфор, а также различные металлы, как, например, железо, медь и цинк. Менее известным элементом является уран, который в обычных условиях представляет собой твердый металл; за последние годы он приобрел важное значение ввиду того, что используется как источник атомной (или ядерной) энергии.

1.6. Наименьшая частица любого элемента, которая может существовать, сохраняя в то же время его свойства, называется атомом этого элемента. Следовательно, существуют атомы водорода, железа, урана и вообще атомы всех элементов. Атомы водорода являются наиболее легкими, а атомы урана — наиболее тяжелыми из всех атомов, встречающихся в природе. Еще более тяжелые атомы, например атомы плутония, также являющегося источником ядерной энергии, были получены из атомов урана искусственным путем.

1.7. Каждый атом состоит из относительно тяжелой центральной части — ядра, окруженного несколькими, значительно более легкими частицами, называемыми электронами. Само ядро атома состоит из определенного числа элементарных частиц, называемых протонами и нейтронами. Эти две частицы обладают почти одинаковыми массами, но отличаются друг от друга тем, что протон несет единичный заряд положительного электричества, а нейтрон, как показывает само название, не имеет электрического заряда, т. е. он нейтрален. Наличие протонов в ядре объясняет тот факт, что последнее имеет положительный электрический заряд, однако в нормальном состоянии атома положительный заряд ядра уравновешивается отрицательным зарядом электронов, окружающих ядро.

1.8. Основное различие между атомами различных элементов заключается в числе протонов (элементарных положительных зарядов), имеющихся в ядрах; это число называется атомным номером элемента. Например, в ядре атома водорода имеется только один протон, в ядре атома гелия — два протона, в ядре атома урана — 92 протона, а плутония — 94 протона. Хотя ядра всех атомов данного элемента содержат одинаковое число протонов, они могут иметь различное число нейтронов. Разновидности атомов, имеющих одинаковый атомный номер, но отличающихся своей массой, называются **изотопами** данного элемента. Большинство эле-

ментов (кроме примерно двадцати) встречаются в природе в виде двух или более изотопов; много других изотопов было получено искусственно различными способами, однако они неустойчивы, т. е. являются радиоактивными.

Высвобождение ядерной энергии. Реакции деления и синтеза

1.9. Как было указано выше, взрыв является результатом очень быстрого выделения большого количества энергии. В случае обычного взрыва эта энергия выделяется за счет перестройки атомов взрывчатого вещества, например атомов водорода, углерода, кислорода и азота, имеющихся в тротиле. При ядерном же взрыве энергия выделяется вследствие перераспределения или рекомбинации протонов и нейтронов в атомных ядрах. Таким образом, то, что обычно называется атомной энергией, в действительности является ядерной энергией, поскольку она выделяется в результате определенных ядерных превращений. Поэтому атомные бомбы называются также ядерным оружием. Силы, действующие между протонами и нейтронами в атомных ядрах, несравненно больше, чем силы, действующие между атомами в целом, поэтому при одинаковых массах обычных взрывчатых веществ и ядерного делящегося вещества количество выделяющейся ядерной (атомной) энергии во много раз больше обычной энергии.

1.10. Известно много ядерных процессов, однако не все они сопровождаются выделением энергии. Для протекания процесса с выделением энергии необходимо, чтобы суммарная масса частиц, вступающих во взаимодействие, была больше массы продукта (или продуктов) реакции. Если в ходе ядерной реакции масса уменьшается, то выделяется определенное количество энергии, эквивалентное уменьшению массы. Такое изменение массы при ядерных реакциях свидетельствует о различных энергиях связи частиц в различных ядрах. Один из основных законов природы гласит, что преобразование любой системы с меньшей энергией связи между ее составными частями в систему, в которой эта энергия связи больше, должно сопровождаться выделением энергии и соответствующим уменьшением массы.

1.11. Однако, чтобы ядерная энергия выделилась в количествах, достаточных для того, чтобы произошел взрыв, условие, при котором в ядерных процессах должно иметь место уменьшение массы, является необходимым, но недостаточным. Для этого необходимо также, чтобы ядерная реакция, раз начавшись, была самоподдерживающейся, т. е. не прекращалась. Условию быстрого выделения больших количеств энергии могут удовлетворить два типа ядерных превращений, известных под названием **деление и синтез**. Процесс деления происходит в том случае, когда в реакции

участвуют некоторые из наиболее тяжелых ядер (т. е. ядер, имеющих большой атомный номер); синтезу же, наоборот, подвергаются некоторые из наиболее легких ядер (т. е. ядер, имеющих малый атомный номер).

I.12. Для осуществления ядерных взрывов при помощи процесса деления используются определенные изотопы элементов урана и плутония. Когда свободный (т. е. несвязанный) нейтрон проникает в ядро атома, способного делиться, это ядро может расщепиться на две меньшие части. Это и есть процесс деления, который сопровождается выделением большого количества энергии. Образующиеся при этом меньшие (более легкие) ядра называются **продуктами деления**. При полном делении ядер атомов, содержащихся в 1 *кг* урана или плутония, выделяется столько же энергии, сколько выделяется при взрыве 20 тыс. *т* тротила.

I.13. В процессе синтеза два легких ядра соединяются (сливаются) вместе и образуют ядро более тяжелого атома. Примером этого может служить синтез изотопов водорода, известных под названием дейтерия, или «тяжелого водорода». При определенных условиях ядра двух атомов дейтерия могут соединиться и образовать ядро атома более тяжелого элемента — гелия с выделением энергии.

I.14. Ядерные реакции синтеза могут быть осуществлены при весьма высоких температурах, поэтому они называются термоядерными реакциями. Количество фактически высвобождаемой энергии при данной массе реагирующего вещества зависит от того, какой именно изотоп (или изотопы) участвует в ядерной реакции синтеза. Например, при полном синтезе ядер всех атомов, имеющихся в 1 *кг* дейтерия, выделилось бы столько же энергии, сколько выделяется при взрыве около 58 тыс. *т* тротила.

I.15. При определенных ядерных реакциях синтеза, в которых участвуют ядра изотопов водорода, освобождаются нейтроны высокой энергии (см. § I.55). Эти нейтроны могут вызвать деление ядер атомов урана или плутония. Следовательно, если совместить определенные реакции синтеза с реакцией деления, то делящееся вещество при этом может быть использовано полнее для получения энергии. Поэтому устройство, в котором происходят реакции и деления и синтеза (термоядерные), может дать взрыв огромной мощности.

I.16. Иногда устанавливают различие между атомным оружием, в котором энергия выделяется в результате процесса деления ядер, и водородным (термоядерным) оружием, в котором энергия выделяется за счет реакций синтеза. Однако и в том и в другом случае энергия взрыва выделяется в результате ядерных реакций, поэтому оружие обоих видов может быть правильно названо ядерным (или атомным) оружием. В данной книге будут

применяться более общие термины «ядерная бомба» и «ядерное оружие» независимо от типа реакции, в результате которой выделяется энергия взрыва.

Энергия ядерного взрыва

I.17. Мощность ядерного взрыва определяется общим количеством выделяемой энергии (выходом энергии), сравниваемой с энергией, выделяемой при взрыве эквивалентного количества тротила. Так, ядерной бомбой с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* называется такая бомба, при взрыве которой выделяется столько же энергии, сколько выделяется при взрыве 1 тыс. *т* тротила. Аналогично этому взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* эквивалентен взрыву 1 млн. *т* тротила. Тротиловый эквивалент первых образцов ядерных бомб, как, например, бомб, взорванных над японскими городами в 1945 г. или в ходе испытаний в 1946 г. на атолле Бикини, составлял около 20 тыс. *т*. С тех пор были разработаны значительно более мощные боеприпасы, тротиловый эквивалент которых измеряется миллионами тонн.

I.18. Выше указывалось (§ I.12), что при полном делении ядер атомов, содержащихся в 1 *кг* урана или плутония, выделяется столько же энергии, сколько выделяется при взрыве 20 тыс. *т* тротила. Это означает, что при взрыве ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* делению подвергается 1 *кг* делящегося вещества. Однако действительное количество урана или плутония, содержащегося в такой бомбе, превышает 1 *кг*. Другими словами, при взрыве ядерного заряда только часть содержащегося в нем делящегося вещества подвергается делению. Поэтому говорят, что коэффициент полезного действия ядерного заряда (бомбы) менее 100%.

Распределение энергии при ядерных взрывах

I.19. При взрыве обычной (снаряженной тротилом) бомбы почти вся выделяющаяся энергия непосредственно проявляется в виде кинетической (тепловой) энергии продуктов взрыва. В этом случае выделяющаяся энергия, как указывалось в § I.1, почти полностью расходуется на образование ударной волны или волны сжатия грунта. В случае же взрыва ядерного заряда только 85% энергии, выделяющейся при делении ядер, проявляется в виде тепловой (кинетической) энергии, и лишь часть из этих 85% расходуется на образование ударной волны или волны сжатия грунта. Остальная часть этих 85% расходуется на образование светового излучения, т. е. световых и тепловых лучей. Это происходит потому, что при ядерном взрыве достигается значительно более высокая температура, чем при обычном взрыве.

Доля энергии деления, приходящаяся на световое излучение, колеблется в зависимости от типа ядерного оружия и условий взрыва; при достаточно высоком воздушном взрыве она составляет примерно 35%. Следовательно, на образование ударной волны или волны сжатия расходуется около 50% всей выделенной энергии (рис. I.19).

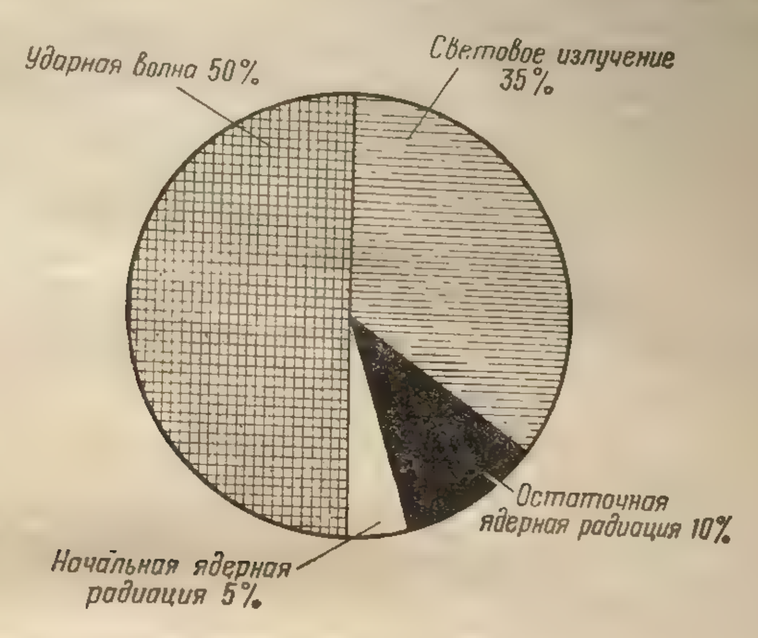


Рис. I.19. Распределение энергии при типичном воздушном взрыве

I.20. Остальные 15% энергии ядерного взрыва приходятся на долю различных ядерных излучений. Из них 5% составляет начальная ядерная радиация, испускаемая в течение примерно одной минуты от момента взрыва, и 10% приходятся на долю остаточной ядерной радиации, испускаемой в течение сравнительно длительного времени. Остаточная радиация почти полностью исходит от радиоактивных продуктов деления, остающихся после взрыва. Следует отметить, что при обычном взрыве никакой ядерной радиации не бывает, поскольку в этом случае ядра атомов не претерпевают изменений.

I.21. Начальная ядерная радиация состоит главным образом из **гамма-лучей** (подобных рентгеновским лучам) и нейтронов. И те и другие, особенно гамма-лучи, в воздухе способны преодолевать значительные расстояния и проникать через значительную толщу различных материалов. Поскольку ядерную радиацию нельзя видеть или ощущать, но в то же время она наносит поражение организму даже на значительном расстоянии от места ее возникновения, она является очень важным поражающим фактором ядерного взрыва.

I.22. В процессе радиоактивного распада продукты деления испускают гамма-лучи и **бета-частицы**. Бета-частицы представляют собой движущиеся с большой скоростью электроны, т. е. частицы, входящие в состав атома и имеющие отрицательный электрический заряд (§ I.7). Бета-частицы также невидимы и хотя обладают меньшей проникающей способностью, чем гамма-лучи, они, подобно последним, также опасны для организма.

I.23. Самопроизвольное испускание бета-частиц и гамма-лучей радиоактивными веществами, например продуктами деления ядер, является постепенным процессом. Оно происходит в течение некоторого времени, причем интенсивность излучения зависит от природы радиоактивного вещества и его количества. Ввиду непрерывного распада с течением времени уменьшается как количество радиоактивного вещества, так и интенсивность излучения. Это означает, что остаточная ядерная радиация, источником которой в основном являются продукты деления, имеет наибольшую интенсивность сразу после взрыва, ослабевая с течением времени.

Виды ядерных взрывов

I.24. Внешняя картина взрыва, а также действие ударной волны, волны сжатия грунта, светового излучения и ядерной радиации изменяются в зависимости от расположения центра взрыва по отношению к поверхности земли. Обычно различают четыре вида взрывов, хотя на практике может быть много различных промежуточных случаев. Эти четыре вида взрывов, определение которых будет дано ниже, следующие: а) воздушный взрыв, б) подводный взрыв, в) подземный взрыв и г) наземный (надводный) взрыв.

I.25. Почти одновременно с ядерным взрывом образуется сильно нагретая светящаяся масса сферической формы, называемая **огненным шаром. Воздушным** взрывом называется взрыв, произведенный в воздухе над землей или водой на такой высоте, при которой огненный шар в момент его максимальной яркости не касается поверхности земли. Например, при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* диаметр огненного шара в момент наибольшей его яркости может достичь величины 1750 *м*. Это значит, что взрыв такой бомбы будет воздушным в том случае, если он произойдет на высоте не менее 875 *м* над поверхностью земли.

I.26. Количественные характеристики воздушного взрыва зависят от фактической высоты взрыва, а также от его мощности, однако общая картина взрыва при всех воздушных взрывах одинакова. Почти вся механическая энергия взрыва проявляется в виде воздушной ударной волны, хотя, если взрыв происходит достаточно близко к поверхности земли, возникает и некоторая волна сжатия грунта. Световое излучение распространяется на большое расстоя-

ние и оказывается настолько интенсивным, что в достаточно ясный день при взрыве, например, бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* может вызвать ожоги средней тяжести на открытых участках тела на расстоянии около 19 *км*. Тепло же от такого взрыва можно ощущать на расстоянии до 120 *км*. При воздушных взрывах большей мощности эти расстояния, конечно, будут соответственно бо́льшими. Поскольку световое излучение сильно задерживается обычными непрозрачными материалами, здания и одежда могут служить защитой от него.

1.27. Начальная ядерная радиация при воздушном взрыве также распространяется на значительное расстояние, хотя с увеличением расстояния от места взрыва ее интенсивность падает довольно быстро. Подобно рентгеновским лучам, ядерные излучения имеют большую проникающую способность. И для того чтобы уменьшить их интенсивность до безопасной величины, требуется достаточно толстый защитный слой материала (предпочтительно материала, имеющего большую плотность). Например, для того чтобы человек, находящийся на расстоянии 1,6 *км* от места воздушного взрыва ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, был в относительной безопасности от действия начальной радиации, он должен находиться под защитой слоя стали толщиной 30 *см* или бетона толщиной 120 *см*.

1.28. В случае высокого или относительно высокого воздушного взрыва продукты деления, остающиеся после взрыва, распространяются на большие расстояния. На поверхности земли остаточная радиация, источником которой являются эти продукты, имеет небольшое значение. Но если взрыв происходит вблизи поверхности земли, то продукты деления смешиваются с частицами грунта, большая часть которых выпадает на землю недалеко от места взрыва. Местность при этом заражается радиоактивными веществами и может представлять опасность для живых организмов.

1.29. Если ядерный взрыв происходит при условиях, когда его центр находится под землей или под водой, то такой взрыв называется соответственно **подземным или подводным**. Поскольку эти два вида взрывов имеют много общего, они рассматриваются в данной книге вместе.

1.30. При подземном (подводном) взрыве большая часть энергии проявляется в виде подземной или подводной волны сжатия (подводной ударной волны), однако некоторая часть энергии взрыва расходуется на образование воздушной ударной волны, причем эта часть тем меньше, чем больше глубина взрыва. Большая часть светового излучения и начальной ядерной радиации поглощается средой на небольшом расстоянии от центра взрыва. Энергия поглощенных излучений расходуется на нагревание грунта или массы воды. В зависимости от глубины взрыва некоторая часть светового излучения и ядерной радиации будет проникать

через поверхность земли (воды), однако интенсивность их будет меньше, чем при воздушном взрыве. Остаточная ядерная радиация при этих видах взрывов имеет более важное значение, так как в районе взрыва большое количество грунта или воды оказывается зараженным радиоактивными продуктами взрыва.

I.31. **Наземным (надводным)** называется такой взрыв, который происходит на поверхности земли (воды) или же в воздухе на такой высоте, при которой огненный шар (в стадии максимальной яркости) касается поверхности земли (воды). В результате такого взрыва образуются воздушная ударная волна и волна сжатия грунта (подводная ударная волна), распределение энергии между которыми зависит от высоты центра взрыва над поверхностью. От высоты взрыва зависит также энергия светового излучения и начальной ядерной радиации, испускаемых огненным шаром. Остаточная ядерная радиация может представить значительную опасность, поскольку взрыв поднимает огромные массы радиоактивно зараженной пыли (или воды).

I.32. Хотя каждый из указанных четырех видов взрывов и рассматривался самостоятельно, в действительности между ними невозможно провести четкого разграничения. Ясно, что с уменьшением высоты воздушный взрыв превратится в наземный (надводный) взрыв. Точно так же наземный (надводный) взрыв становится подземным (подводным) на небольшой глубине, когда огненный шар частично образуется ниже поверхности земли (воды). Несмотря на это, представляется целесообразным, как будет показано в следующих главах, делить ядерные взрывы на четыре вида, определение которых было дано выше.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ[1]

Цепная ядерная реакция

I.33. Явление деления ядра атома урана или плутония путем захвата одного нейтрона замечательно тем, что при этом, кроме выделения большого количества энергии, мгновенно испускаются два или более новых нейтрона. Освобождающиеся таким образом нейтроны сами способны вызвать деление ядер других атомов с испусканием новых нейтронов, которые могут вызвать дальнейшее деление ядер и т. д. Таким образом, в принципе один-единственный нейтрон может положить начало целой цепи ядерных делений, причем число вовлекаемых в этот процесс ядер и количество освобождаемой энергии возрастают с колоссальной скоростью.

---

[1] Этот раздел при чтении данной главы может быть опущен.

I.34. В действительности не все нейтроны, освобождаемые в процессе деления, вызывают новое деление; некоторые из этих нейтронов выходят из сферы реакции, а другие вступают в реакцию, не вызывая деления. Все же для простоты можно предположить, что при делении ядра каждого атома урана или плутония освобождаются два нейтрона, способных вызвать дальнейшее деление. Пусть в некоторой массе урана один нейтрон был захвачен ядром и произошло деление; при этом освобождаются два нейтрона, которые вызывают деление двух других ядер. Освобождающиеся четыре нейтрона вызывают деление четырех ядер и т. д.

I.35. Таким образом, число нейтронов, а следовательно, и число ядер, подвергающихся делению, с каждым циклом удваивается; число нейтронов таким образом быстро растет по закону геометрической прогрессии (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, ...). Менее чем за 90 циклов деления освобождается такое количество нейтронов, которое достаточно для деления ядер всех атомов, содержащихся в 50 *кг* урана; при этом выделяется столько же энергии, сколько выделяется при взрыве 1 млн. *т* тротила.

I.36. Время, необходимое для процесса деления, весьма мало; большая часть нейтронов, освобождаемых при делении, также испускается очень быстро. Поэтому промежуток времени между следующими один за другим актами деления определяется средним временем, протекающим с момента испускания нейтрона до его захвата ядром, способным к делению. Это время зависит также и от энергии (или скорости) нейтрона; если нейтроны имеют достаточно высокую энергию (такие нейтроны обычно называются быстрыми), то это время составляет около одной стомиллионной доли секунды. Следовательно, 90 циклов деления протекают менее чем за одну миллионную долю секунды. Выделение энергии, эквивалентной энергии взрыва 1 млн. *т* тротила в такой малый промежуток времени, и создает условия для взрыва колоссальной силы.

I.37. Из изложенного видно, что процесс деления ядер сопровождается мгновенным освобождением нейтронов и выделением энергии; благодаря этому в принципе возможно вызвать саморазвивающуюся цепную ядерную реакцию. В результате этого можно добиться того, что несколько килограммов делящегося вещества в течение незначительной доли секунды могут выделить столько же энергии, сколько выделяется при взрыве тысяч (или миллионов) тонн тротила. В этом и заключается основной принцип действия ядерной бомбы, снаряженной делящимися веществами.

Критическая масса ядерного заряда

I.38 Выше указывалось, что часть нейтронов, освобождаемых при делении, вылетает за пределы сферы реакции или же захватывается, не производя деления. Если количество нейтронов, теряемых в результате этих двух явлений, больше, чем количество

нейтронов, вновь образуемых при делении, то цепная реакция прервется. При этом выделится некоторое количество энергии, но оно не будет достаточным, а выделение будет слишком медленным, чтобы произошел эффективный взрыв. Следовательно, для осуществления взрывной ядерной реакции необходимо создать условия, при которых потеря нейтронов будет минимальной. В этом отношении особенно важное значение имеют нейтроны, которые вылетают из массы делящегося вещества и не принимают участия в реакции.

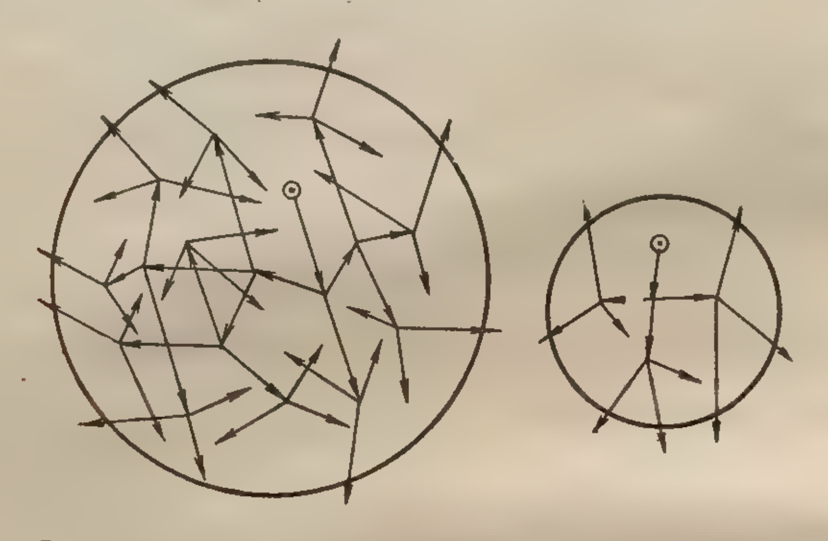


Рис. I.40. Схема, иллюстрирующая уменьшение относительного количества выходящих из сферы реакции нейтронов с увеличением количества делящегося вещества

I.39. Нейтроны вылетают за пределы сферы реакции через поверхность массы урана или плутония. Следовательно, чем больше поверхность, тем больше будет потеря нейтронов. С другой стороны, процесс деления, в результате которого происходит освобождение новых нейтронов, происходит во всей массе делящегося вещества; следовательно, количество вновь образующихся нейтронов пропорционально объему этого вещества. Таким образом, относительное количество нейтронов, вылетающих из сферы реакции, может быть уменьшено путем увеличения размеров делящегося вещества, так как при этом отношение поверхности к объему уменьшается.

I.40. Это положение легче понять, если рассмотреть рис. I.40, на котором показано два шарообразных куска делящегося вещества, из которых один больше другого; в обоих случаях процесс деления начинается одним нейтроном, изображенным на рисунке в виде точки в окружности. Предполагается, что при каждом акте деления освобождаются три нейтрона, т. е. поглощается один ней-

трон, а испускаются три. Выход нейтрона из системы указан стрелкой. Если конец стрелки находится внутри шара, это означает, что произошло деление и выделилось дополнительное количество нейтронов; если же конец стрелки находится за пределами шара, то нейтрон потерян. Из рис. I.40 видно, что относительное количество потерянных нейтронов для малого шара значительно больше, чем для большого.

I.41. Если масса урана или плутония мала, т. е. если отношение поверхности к объему велико, то количество нейтронов, вышедших из системы, будет так велико, что создание цепной ядерной реакции, а следовательно, и осуществление взрыва окажутся невозможными. Но с увеличением количества урана или плутония относительная потеря нейтронов уменьшается и наступает момент, когда реакция становится самоподдерживающейся. Количество делящегося вещества, соответствующее этому моменту, получило название **критической массы.**

I.42. Таким образом, для того чтобы произошел ядерный взрыв, необходимо, чтобы в боеприпасе имелось количество урана или плутония, превосходящее критическую массу при данных условиях. Критическая масса зависит, кроме прочего, от формы куска делящегося вещества, его состава и степени загрязнения (примеси способны поглощать нейтроны, не подвергаясь делению). Потерю нейтронов и величину критической массы можно уменьшить, заключив делящееся вещество в специальную оболочку — отражатель нейтронов.

Образование критической массы

I.43. В атмосфере всегда имеются свободные нейтроны, которые могут рождаться различными путями. Вследствие этого делящееся вещество, масса которого превосходит критическую, может расплавиться или даже взорваться. Поэтому необходимо, чтобы до взрыва ядерной бомбы ни одна часть ее ядерного заряда не имела массы, равной критической при данных условиях. Для того чтобы осуществить взрыв, масса ядерного заряда должна стать сверхкритической, т. е. стать больше критической; создание такой массы должно происходить за короткий промежуток времени, который исключил бы возможность изменения конфигурации заряда (например, расплавление его) до взрыва.

I.44. Известны два метода осуществления ядерного взрыва, т. е. быстрого превращения системы из подкритической в сверхкритическую. Первый метод состоит в том, что два или более куска делящегося вещества, масса каждого из которых меньше критической, очень быстро соединяют друг с другом и получают один кусок, масса которого превосходит критическую. Этого можно достичь, если в устройстве, напоминающем ствол пушки, взрывом обычного взрывчатого вещества соединить один кусок делящегося

вещества, имеющий массу, меньшую, чем критическая, с другим таким же куском, закрепленным в противоположном закрытом конце ствола.

I.45. Для осуществления взрыва вторым методом используют явление, при котором определенное количество соответствующего изотопа урана или плутония, масса которого меньше критической, под большим давлением становится критическим или даже сверхкритическим. Причина этого явления состоит в том, что под влиянием высокого давления уменьшаются размеры заряда, а следовательно, и его поверхность (т. е. площадь, через которую вылетают нейтроны); тем самым уменьшается относительное количество нейтронов, вылетающих за пределы сферы. Таким образом, цепная реакция может протекать в делящемся веществе, масса которого была меньше критической до его сжатия.

I.46. В ядерном заряде, действие которого основано на процессе деления, высокое давление создастся с помощью обычного взрывчатого вещества. Из специально изготовленных кусков этого взрывчатого вещества собирается сферическая форма. В центре этой сферы помещается шарообразный ядерный заряд, масса которого меньше критической. Когда обычное взрывчатое вещество взрывается с помощью ряда взрывателей, расположенных снаружи, возникает взрывная волна, направленная внутрь системы. Как только эта волна достигает уранового (или плутониевого) шара, она заставляет его сжаться, вследствие чего он становится сверхкритическим и взрывается.

Продукты деления

I.47. Когда ядра атомов урана или плутония захватывают нейтроны и подвергаются делению, образуется множество различных осколков деления, т. е. ядер продуктов деления. Это объясняется тем, что в процессе деления ядра могут расщепляться различными способами (около 40 способов). Большинство осколков (приблизительно 80), образующихся таким путем, являются ядрами радиоактивных изотопов общеизвестных, более легких элементов. Радиоактивность продуктов деления обычно проявляется в испускании отрицательно заряженных бета-частиц (см. § I.22). Испускание бета-частиц часто (но не всегда) сопровождается излучением гамма-лучей, которые уносят избыточную энергию. В некоторых, особых, случаях испускается только гамма-излучение.

I.48. В результате испускания бета-частицы ядро атома радиоактивного вещества превращается в ядро атома другого элемента, который иногда называют **продуктом распада.** Продукты распада осколков деления, как правило, тоже являются радиоактивными и могут распадаться с испусканием бета-частиц и гамма-лучей.

В среднем каждый осколок деления претерпевает три последовательных радиоактивных распада, прежде чем превратится в устойчивое (нерадиоактивное) ядро. Ввиду того, что деление ядер происходит многими способами, а также потому, что различные осколки деления оказываются в различных стадиях распада, смесь продуктов деления ядер оказывается весьма сложной по составу[1]. Среди продуктов деления было обнаружено более 200 различных изотопов 35 легких элементов (от цинка до гадолиния).

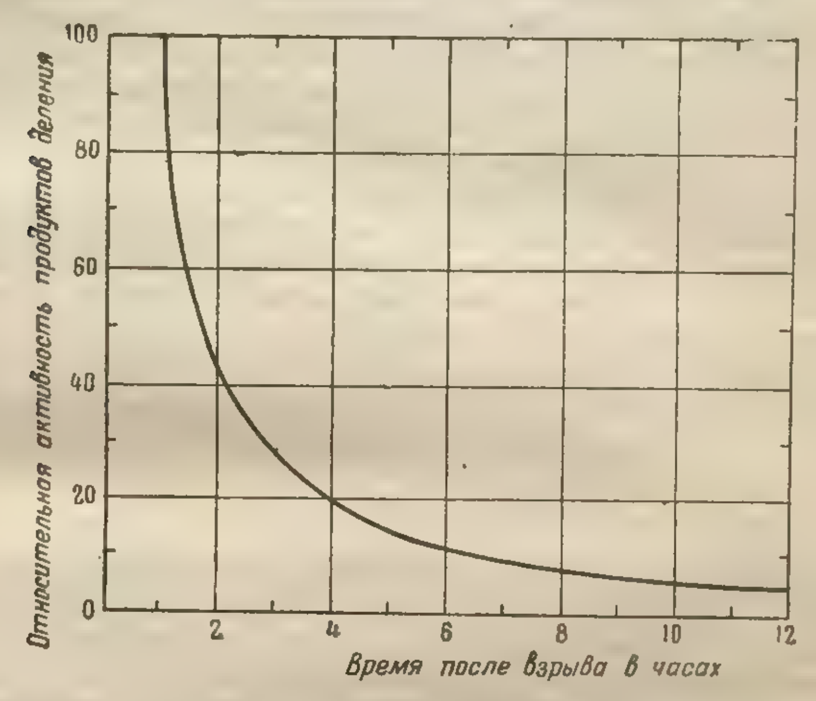


Рис. I.50. Уменьшение активности продуктов деления после ядерного взрыва (активность через 1 час после взрыва принята равной 100)

I.49. Скорость радиоактивного распада данного изотопа, т. е. интенсивность испускания им бета-частиц и гамма-лучей, обычно определяется его **периодом полураспада.** Под периодом полураспада подразумевается время, в течение которого радиоактивность некоторого количества данного радиоизотопа уменьшается до половины своего первоначального значения. Каждое радиоактивное вещество имеет свой определенный период полураспада, который не зависит ни от физического состояния, ни от количества этого вещества. Было найдено, что периоды полураспада различных про-

---

[1] Для наименования сложной смеси, образующейся за короткий промежуток времени деления, употреблен общий термин «продукты деления».

дуктов деления составляют от небольшой доли секунды до значения порядка 1 миллиона лет.

I.50. Хотя каждый радиоактивный изотоп, входящий в состав продуктов деления, имеет свой период полураспада, смесь этих изотопов, образующаяся при ядерном взрыве, имеет настолько сложный состав, что невозможно точно определить ее период полураспада в целом. Тем не менее из данных, полученных путем многократных экспериментальных измерений, было установлено, что уменьшение интенсивности излучения продуктов деления в целом может быть вычислено с помощью довольно простой формулы. Эта формула будет рассмотрена в главе IX, однако представление о характере уменьшения активности продуктов деления можно получить из графика (рис. I.50), построенного согласно упомянутой формуле. На рисунке остаточная радиоактивность продуктов деления спустя один час после взрыва принята за 100, дальнейшее уменьшение активности во времени выражается кривой. Из графика видно, что через 7 часов после взрыва активность продуктов деления уменьшится до одной десятой части (10%) той величины, которую она имела спустя один час после взрыва. Спустя два дня активность уменьшится примерно до 1% величины, которую она имела через один час после взрыва.

Альфа-активность

I.51. Кроме бета- и гамма-активности, характерной для продуктов деления, существует еще третий вид радиоактивности, о котором следует упомянуть. Этим видом активности обладают делящиеся вещества, часть которых, как указывалось в § I.18, не подвергается делению в момент взрыва. Как уран, так и плутоний являются радиоактивными: они испускают **альфа-частицы.** Эти частицы являются одним из видов ядерных излучений, однако они отличаются от бета-частиц, испускаемых продуктами деления, тем, что значительно тяжелее их и имеют положительный электрический заряд. Альфа-частицы идентичны с ядрами атомов гелия.

I.52. Ввиду того, что масса и заряд альфа-частиц больше, они обладают меньшей проникающей способностью, чем бета-частицы и гамма-лучи одинаковой с ними энергии. Например, весьма немногие альфа-частицы, испускаемые радиоактивными веществами, имеют длину пробега в воздухе более 2,5—7,5 *см*. Эти частицы едва ли могут проникнуть через неповрежденную кожу человека; одежда их задерживает. Следовательно, уран и плутоний, остающиеся после взрыва, непосредственно не представляют собой опасности. Однако если эти вещества, особенно плутоний, попадут в организм в достаточном количестве (например, с пищей, водой, через дыхательные пути или поврежденные части кожи), то последствия могут быть серьезными.

Реакции синтеза или термоядерные реакции

I.53. На Солнце и звездах энергия выделяется за счет реакций синтеза, в которых участвуют ядра атомов легких (с малым атомным весом) элементов. Из опытов, произведенных в лабораториях при помощи циклотронов и других подобных установок, была установлена возможность синтеза изотопов водорода. Известно, что водород имеет три изотопа, ядра которых обладают массой 1, 2 и 3. Эти изотопы называются соответственно водород (H^1), дейтерий (H^2 или $Д^2$) и тритий (H^3 или T^3). Ядра всех этих изотопов несут в себе по одному положительному заряду, т. е. каждое ядро содержит один протон, но отличается от других по числу нейтронов. Ядра наиболее легкого изотопа H^1 не содержат нейтронов; ядра дейтерия H^2 содержат по одному нейтрону, а ядра трития H^3 — по два нейтрона.

I.54. Установлено, что между ядрами трех изотопов водорода протекает несколько реакций синтеза, в которых участвуют два одинаковых или два различных ядра. Для эффективного протекания этих реакций ядра должны обладать высокой энергией. Одним из способов сообщения ядрам такой высокой энергии является использование ускорителей заряженных частиц, например циклотрона. Другой способ состоит в нагревании реагирующих веществ до очень высоких температур. В последнем случае процесс синтеза, как указывалось ранее, называется **термоядерной реакцией.**

I.55. Для получения энергии представляют интерес четыре термоядерные реакции синтеза, поскольку при практически достижимых температурах они протекают достаточно быстро[1]. Эти реакции следующие:

$$H^2 + H^2 = He^3 + n + 3{,}2\ \textit{Мэв}$$
$$H^2 + H^2 = H^3 + H^1 + 4\ \textit{Мэв}$$
$$H^3 + H^2 = He^4 + n + 17\ \textit{Мэв}$$
$$H^3 + H^3 = He^4 + 2n + 11\ \textit{Мэв},$$

где символом He обозначен элемент гелий, а символом n — нейтрон, имеющий массу 1. Выделяющаяся при каждой реакции энергия выражена в миллионах электроновольт (*Мэв*)[2]. Не вдаваясь в подробности, можно утверждать, что при делении ядра урана (или плутония) с массовым числом около 240 атомных единиц массы выделяется энергия, равная 200 *Мэв*. При синтезе 5 ядер дейтерия, имеющих общее массовое число 10 атомных единиц

---

[1] См. статью L. N. Ridenour в журнале «Scientific American», 182, № 3, стр. 11 (1950 г.) и статью A. Bethe там же, 182, № 4, стр. 18 (1950 г.).

[2] Один электроновольт (*эв*) — это энергия, которую получит единичный электрический заряд, т. е. электрон, ускоренный разностью потенциала в 1 *в*. 1 *Мэв* в миллион раз больше электроновольта и эквивалентен $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ эрг (*э*) или $1{,}6 \cdot 10^{-13}$ *дж*.

массы, в среднем освобождается около 24,2 *Мэв*. Таким образом, при одинаковых весах при синтезе ядер дейтерия выделяется примерно в три раза больше энергии, чем при делении ядер урана или плутония.

I.56. Для протекания ядерных реакций синтеза требуется температура порядка миллиона градусов. Единственным способом создания такой высокой температуры является ядерный взрыв урановой (плутониевой) бомбы. Следовательно, если в одном и том же устройстве поместить делящееся вещество и некоторое количество дейтерия или трития (или же их смеси), то можно инициировать одну или несколько термоядерных реакций синтеза, приведенных выше. Для осуществления термоядерного взрыва необходимо, чтобы эти реакции, сопровождаемые выделением энергии, быстро протекали во всей массе определенного количества изотопа (или изотопов) водорода.

I.57. Следует отметить, что две из приведенных реакций, в которых участвует тритий H^3, представляют особый интерес по нескольким причинам. Эти реакции не только протекают быстрее и дают больше энергии, чем те, в которых участвует только дейтерий, но в процессе их освобождается один или два нейтрона. Эти нейтроны, как было указано в § I.15, способны вызывать деление урана или плутония и тем самым увеличить общее количество энергии, выделяющейся при комбинированной реакции.

ГЛАВА II

ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ

Введение

II.1. При ядерном взрыве происходит ряд специфических явлений; некоторые из них производят видимые эффекты, тогда как другие непосредственно не проявляются. Как указывалось в главе I, некоторые особенности этих явлений зависят от вида взрыва, т. е. от того, происходит ли взрыв в воздухе, на поверхности земли (воды) или под землей (водой). Кроме того, на некоторые наблюдаемые эффекты могут повлиять метеорологические условия, такие, как температура, влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра, атмосферные осадки, хотя характерные особенности взрывов, которые будут описаны ниже, всегда остаются неизменными.

II.2. В данной главе рассматриваются явления, которые сопровождают главным образом воздушные или произведенные невысоко над поверхностью земли взрывы ядерных бомб с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*. Данные о подводных взрывах на небольшой глубине относятся к единственному взрыву, произведенному у атолла Бикини в 1946 г. на глубине около 60 *м* (тротиловый эквивалент при этом составлял 20 тыс. *т*). Кроме того, приводятся также данные о том, какие последствия можно ожидать при ядерных взрывах других мощностей.

II.3. Данные, приводимые ниже, прежде всего относятся к взрыву, происходящему в воздухе на значительной высоте над поверхностью земли (воды). Затем рассматриваются те изменения, которые претерпевают описываемые явления при наземном (надводном) взрыве, и в заключение будут указаны некоторые особые явления, характерные для подводного (подземного) взрыва.

ВОЗДУШНЫЙ И НАЗЕМНЫЙ (НАДВОДНЫЙ) ВЗРЫВЫ

Огненный шар

II.4. Как было указано выше, деление ядер урана или плутония в ядерном заряде приводит к выделению огромного количества энергии в небольшом объеме вещества в течение весьма короткого

промежутка времени. Вследствие этого продукты деления, оболочка заряда и другие части бомбы, а также окружающий воздух нагреваются до очень высоких температур, приближающихся к температуре в центре Солнца. Максимальная температура, которая достигается при взрыве атомной бомбы, вероятно, составляет несколько миллионов градусов. Для сравнения можно указать, что при взрыве обычной бомбы, снаряженной тротилом, максимальная температура достигает лишь 5000° С. Под действием огромного ко-

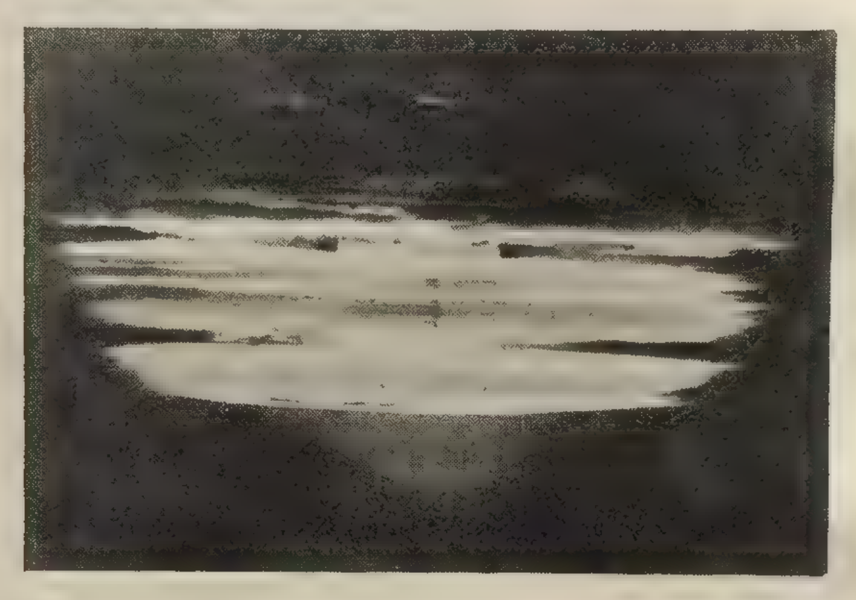


Рис. II.5. Огненный шар, образовавшийся при воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн (сфотографирован на высоте 3,6 *км* на расстоянии около 80 *км*); огненный шар частично закрыт конденсационным облаком (см. § II.43)

личества тепла, выделяющегося при ядерном взрыве, все вещества испаряются и переходят в газообразное состояние. Поскольку эти газы в момент взрыва занимают ограниченный объем (объем самой бомбы), они создают колоссальное давление. Это давление, вероятно, в сотни тысяч раз больше атмосферного, т. е. составляет несколько сот тысяч килограммов на квадратный сантиметр.

II.5. За несколько миллионных долей секунды, в течение которых происходит взрыв бомбы, сильно нагретые газы, находящиеся под очень высоким давлением, образуют сферическую ярко светящуюся массу. Это и есть огненный шар, о котором говорилось в § I.25. На рис. II.5 показан типичный огненный шар, образующийся при воздушном взрыве. Хотя яркость свечения со временем уменьшается, все же примерно через 0,7 *мсек*[1] огненный

[1] Миллисекунда (*мсек*) — это одна тысячная часть секунды.

шар, образующийся при взрыве ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, на расстоянии около 100 *км* от места взрыва кажется в 30 раз ярче солнца (при максимальной его яркости в полдень). Во время нескольких взрывов, произведенных на полигоне в штате Невада, где испытывалось только оружие с тротиловым эквивалентом менее 100 тыс. *т*, яркий отблеск на небе в ранние утренние часы наблюдался на расстоянии 640 *км* и более.

II.6. Яркость свечения огненного шара, как правило, сильно не меняется с изменением энергии (или мощности) взрыва. Это указывает на то, что температура поверхности огненного шара, от которой зависит его яркость, остается почти одинаковой при взрывах бомб различной мощности.

II.7. Сразу же после своего образования огненный шар начинает увеличиваться в размерах, вовлекая в себя окружающий воздух. Увеличение размеров огненного шара сопровождается понижением его температуры (и давления), а поэтому и яркости свечения. Одновременно огненный шар поднимается вверх, подобно воздушному шару. Спустя 0,7 *мсек* после взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* огненный шар имеет радиус около 70 *м*, а через 10 секунд его радиус достигает максимальной величины, составляющей около 1 *км*. В это время огненный шар поднимается со скоростью 75—100 *м/сек*. Спустя примерно минуту после взрыва огненный шар остывает настолько, что перестает быть видимым. За это время он поднимается на высоту около 7 *км* от центра взрыва.

Атомное (радиоактивное) облако взрыва

II.8. В период наибольшей яркости огненного шара его температура настолько высока, что по крайней мере во внутренних частях его все вещества, из которых состояла бомба, находятся в газообразном состоянии. К таким веществам относятся радиоактивные продукты деления, уран (или плутоний), не подвергшийся делению, оболочка заряда и другие части бомбы. По мере того как огненный шар увеличивается в размерах и охлаждается, газы конденсируются и образуют облако, состоящее из твердых частиц вещества бомбы, а также из множества мелких капель воды, находившейся в воздухе, вовлеченном в поднимающийся огненный шар.

II.9. Образовавшееся таким путем атомное облако взрыва вначале имеет красный или красновато-бурый цвет, так как на поверхности огненного шара всегда имеются цветные компоненты, в частности азотная кислота и различные окислы азота. Эти вещества образуются в результате химического взаимодействия между имеющимися в воздухе азотом, кислородом и парами воды, про-

исходящего при высокой температуре. Когда огненный шар остывает и происходит конденсация паров воды с образованием мельчайших капелек, облако светлеет, приближаясь по цвету к обычным облакам.



Рис. II.10. Столб пыли, втянутый в облако взрыва восходящими потоками воздуха при воздушном взрыве

II.10. В зависимости от высоты взрыва и характера местности в непосредственной близости от места взрыва образуются потоки воздуха, направленные от периферии к центру и вверх. Эти потоки поднимают с поверхности земли большое количество пыли и других частиц и увлекают их в атомное облако взрыва (рис. II.10).

II.11. Частицы пыли сначала увлекаются облаком взрыва вверх, но через некоторое время под влиянием силы тяжести они начинают опускаться с различной скоростью, зависящей от их размеров. Этим объясняется рост облака взрыва, состоящего главным образом из очень маленьких частиц радиоактивных продуктов деления и остатков бомбы, а также из капелек воды, частиц пыли и более крупных частиц, поднятых восходящими потоками воздуха.

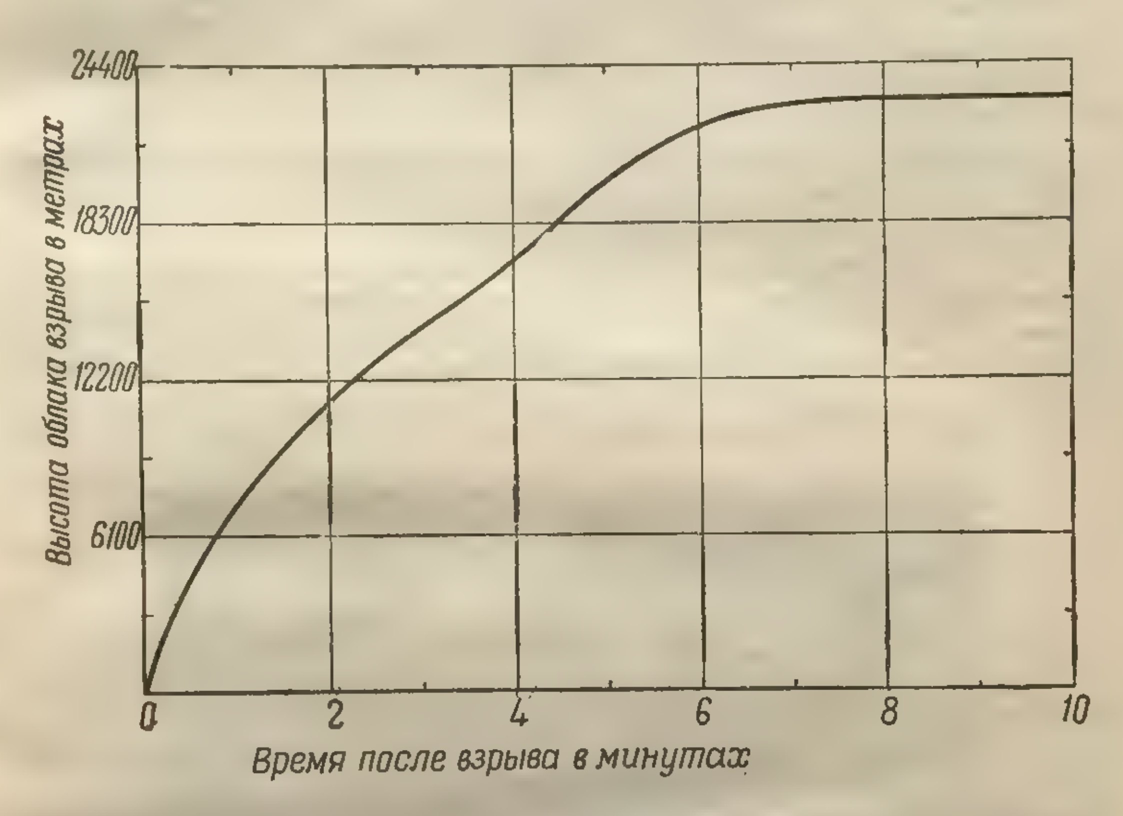


Рис. II.12. Высота подъема облака (над центром взрыва) для различных моментов времени при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*

II.12. Скорость подъема верхней части радиоактивного облака зависит от метеорологических условий и мощности взрыва. Примерные значения скорости подъема облака взрыва приведены в табл. II.12. Представление об этой скорости можно получить также при рассмотрении графика на рис. II.12, из которого видно, что за 30 секунд облако достигает высоты около 5 *км*, а за 1 минуту — около 7 *км*. Средняя скорость подъема за первую минуту составляет около 40 *км/час*.

II.13. Высота, которой в конечном счете достигает радиоактивное облако, зависит от количества тепловой энергии, выделяемой при взрыве, а также от температурного градиента и плотности

Таблица II.12

Скорость подъема радиоактивного облака

Высота, *км*	Время, *мин*	Скорость подъема, *км/час*
3,2	0,3	480
6,4	0,75	320
9,6	1,4	225
16,0	3,8	145
22,4	6,3	56

окружающего воздуха. Как правило, чем больше количество освобождаемой тепловой энергии, тем больше величина подъемной силы, действующей на облако, и, следовательно, тем больше высота его подъема. Вероятно, максимальная высота, достигаемая радиоактивным облаком, ограничивается нижними слоями стратосферы.

II.14. Как правило, с увеличением высоты температура атмосферы понижается. Однако при некоторых условиях в атмосфере

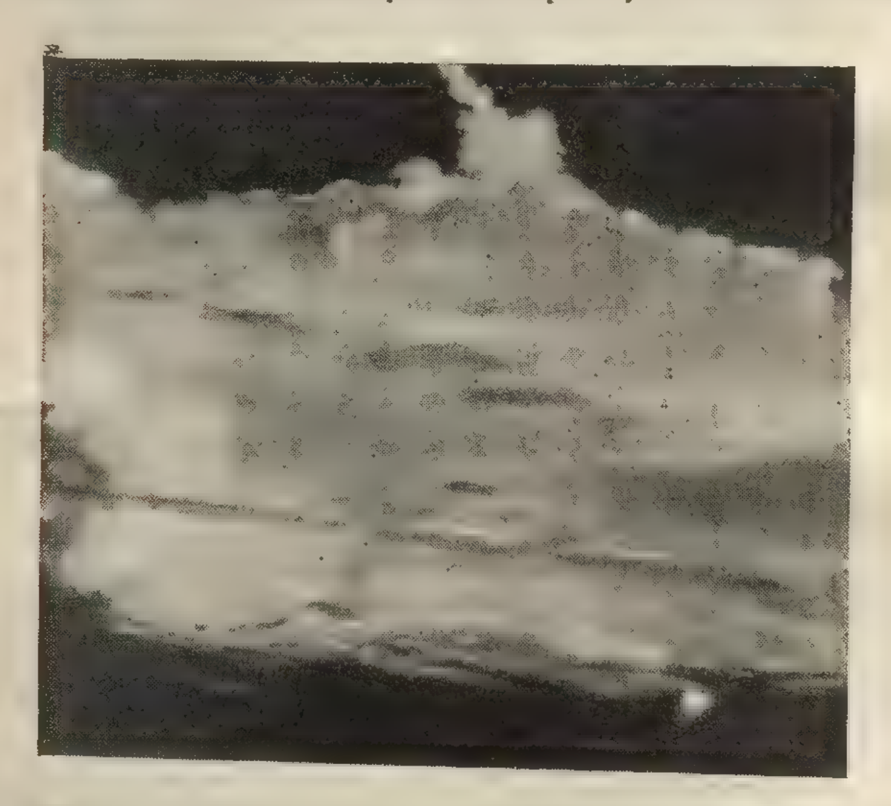


Рис. II.15. Грибовидное облако, образовавшееся при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн (сфотографировано на высоте 3,6 *км* и расстоянии около 80 *км* от места взрыва)

образуется **инверсионный слой**, в котором с увеличением высоты температура повышается. Если радиоактивное облако достигает такого инверсионного слоя, то оно стремится распространяться в горизонтальном направлении. Тем не менее благодаря подъемной силе, которой обладает горячая масса воздуха, большая часть облака обычно проходит через инверсионный слой.

II.15. По достижении слоя, в котором плотность облака становится равной плотности окружающего воздуха, или по достижении нижних слоев стратосферы облако почти перестает подниматься и начинает распространяться в горизонтальном направлении. В результате этого образуется грибовидное облако, характерное для ядерных взрывов (рис. II.15). Максимальная высота, достигаемая нижней частью «шляпки гриба» за 8—10 минут, обычно составляет 8—16 *км*. Верхняя часть грибовидного облака достигает еще большей высоты, которая зависит от мощности взрыва. Например, во время взрывов устройств с тротиловым эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн, произведенных в ходе испытаний в Тихом океане в 1952 и 1954 гг., верхняя часть грибовидного облака достигала высоты около 40 *км*. Грибовидное облако обычно остается видимым в течение часа, пока оно не рассеется ветрами в окружающей атмосфере или не смешается с обычными облаками.

Особенности наземного (надводного) взрыва

II.16. Многие явления, происходящие при взрыве на поверхности земли, аналогичны явлениям, которые наблюдаются при воздушном взрыве; в связи с этим, прежде чем перейти к изложению остальных вопросов, целесообразно указать на некоторые особенности взрыва на поверхности земли (воды). В этом случае огненный шар в начальный момент своего развития касается земли (рис. II.16а). Так как развивающаяся при взрыве температура очень высока, то значительное количество грунта, камней и других материалов, находящихся в районе взрыва, испаряется и захватывается огненным шаром. Расчеты показывают, что если на нагрев грунта будет израсходовано хотя бы только 5% энергии, выделяемой при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, то к обычным веществам, из которых состоит огненный шар, добавится около 20 тыс. *т* испарившегося грунта. Кроме того, возникающие у поверхности земли воздушные потоки поднимут большое количество пыли и других твердых частиц, которые устремятся вверх вслед за поднимающимся огненным шаром (рис. II.16б).

II.17. Таким образом, основное различие между взрывом на поверхности земли и воздушным взрывом состоит в том, что в первом случае радиоактивное облако значительно больше загрязнено



Рис. II.16а. Огненный шар, образовавшийся при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн у поверхности земли. Максимальный диаметр огненного шара составил около 5 *км*



Рис. II.16б. Образование облака пыли при наземном ядерном взрыве

веществами грунта, чем во втором. Поднятая кверху масса грунта включает в себя как очень маленькие частицы, образовавшиеся в результате конденсации при охлаждении огненного шара, так и более крупные частицы. Состав облака взрыва в каждом конкретном случае, разумеется, зависит от характера местности и от того, в какой мере огненный шар касается земли.

II.18. В случае наземного ядерного взрыва при наличии на поверхности земли умеренного количества пыли и других подвижных частиц, как, например, это было при проведении ряда испытаний, скорость подъема радиоактивного облака почти такая же, как и при воздушном взрыве (см. табл. II.12). Радиоактивное облако, прежде чем принять грибовидную форму, описанную в § II.15, поднимается на высоту в несколько километров.

II.19. Вследствие испарения грунта в месте соприкосновения с ним огненного шара, а также вследствие разброса грунта ударной волной и образующимися потоками воздуха на поверхности земли образуется воронка. Размеры воронки зависят от высоты и мощности взрыва, а также от характера грунта. Считается, что для бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* сколько-нибудь значительная воронка может образоваться лишь в том случае, если взрыв происходит на высоте менее 135 *м*.

II.20. Когда ядерный взрыв происходит близко от поверхности воды, большое количество воды испаряется и поднимается вместе с радиоактивным облаком. Например, если предположить, как отмечалось выше (§ II.16), что на испарение расходуется 5% энергии, выделяемой при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, то в пар превратится около 100 тыс. *т* воды. На больших высотах этот пар конденсируется с образованием капелек воды аналогично тому, как это происходит при образовании обычных атмосферных облаков.

Выпадение радиоактивных частиц

II.21. При наземном (надводном) взрыве большое количество грунта (воды) вовлекается в огненный шар на ранней стадии развития последнего и расплавляется или испаряется. Когда огненный шар достаточно охлаждается, то газообразные продукты деления, конденсируясь, захватываются расплавленными частицами грунта. Из твердых частиц грунта, образующихся при дальнейшем охлаждении, лишь незначительная доля оказывается равномерно зараженной радиоактивными продуктами деления по всему объему; основная же масса частиц грунта оказывается зараженной с поверхности, в тонком слое, окружающем эти частицы. Капельки воды заражаются также неравномерно; небольшие частички радиоактивных продуктов деления находятся в отдельных точках внутри капелек. По мере того, как сильное возмущение среды, вы-

званное взрывом, уступает место нормальному состоянию, зараженные частицы грунта и капельки воды постепенно опускаются вниз на землю. Это явление известно под названием выпадения радиоактивных продуктов взрыва. Именно эти выпадающие вещества, радиоактивный распад которых происходит в течение длительного периода времени, являются источником остаточной ядерной радиации, о которой упоминалось в предыдущей главе[1].

II.22. Масштабы и характер выпадения могут изменяться в широких пределах; они определяются конкретным сочетанием нескольких условий (мощность взрыва и конструктивные особенности бомбы, высота взрыва, характер грунта в районе взрыва и метеорологические условия). Например, если взрыв происходит в воздухе на значительной высоте, так что в облако втягивается небольшое количество пыли или воды, то радиоактивные частицы сильно рассеиваются. В таком случае опасность от выпадения радиоактивных осадков оказывается значительно меньше, чем при наземном (надводном) взрыве. Так, например, в городах Хиросима и Нагасаки, над которыми бомбы с тротиловым эквивалентом около 20 тыс. *т* были взорваны на высоте примерно 550 *м*, совершенно не было жертв, вызванных выпадением радиоактивных продуктов взрыва.

II.23. В то же время ядерный взрыв, произведенный на поверхности земли или вблизи от нее, может вызвать сильное радиоактивное заражение местности. Например, 1 марта 1954 г. на атолле Бикини было испытано устройство с мощным термоядерным зарядом, причем взрыв был произведен близко от поверхности кораллового острова; последовавшее выпадение радиоактивных веществ вызвало значительное заражение района площадью в 18 тыс. *км*².

II.24. Зараженный район, грубо говоря, имел сигарообразную форму; он простирался на 350 *км* в направлении ветра и на 32 *км* против ветра. Ширина зараженной полосы местности была различной и наибольшая ее величина составляла около 64 *км*. На форму и размеры территории зараженного района значительное влияние оказывают направление и скорость ветра, в особенности в верхних слоях атмосферы. Как будет показано ниже, для правильного прогноза характера радиоактивного выпадения, вызываемого ядерным взрывом, следует прежде всего учесть параметры ветра.

II.25. Процесс выпадения радиоактивных веществ происходит постепенно, в течение некоторого периода времени. Например, для вышеуказанного взрыва на атолле Бикини, на границах района,

[1] Другим, не менее важным источником указанной радиации является радиоактивность, возникающая в различных веществах в результате захвата нейтронов, освобождаемых в момент взрыва; такая радиоактивность имеет существенное значение в районах, расположенных близко к месту взрыва.

площадь которого составляла 18 тыс. *км*², радиоактивные частицы начали выпадать лишь спустя 10 часов после взрыва. К этому времени радиоактивное облако уже настолько рассеялось, что его не было видно. Из этого вытекает тот важный факт, что выпадение радиоактивных веществ может происходить даже тогда, когда само радиоактивное облако становится невидимым. Тем не менее выпадение в основном обусловливается наличием сравнительно крупных частиц пыли и грунта, зараженных радиоактивными продуктами деления, которые оседают из грибовидного облака сравнительно недалеко от района взрыва. Это иногда называют **местным выпадением.** Кроме того, существует другой тип выпадений, при котором мельчайшие частицы оседают очень медленно и в конце концов довольно равномерно покрывают весьма большие территории; это так называемое рассеянное по всему миру выпадение, обусловливаемое радиоактивными частицами, которые появились в результате всех видов взрывов (см. гл. X).

II.26. Хотя выпадение радиоактивных веществ, последовавшее после испытательного термоядерного взрыва 1 марта 1954 г., являлось наиболее сильным из всех выпадений от других взрывов, когда-либо имевших место, следует отметить, что сильное радиоактивное заражение местности не обязательно является характерным для всякого термоядерного взрыва; также верно и то, что такое заражение может быть не только при термоядерных взрывах. Весьма вероятно, что если бы указанный термоядерный взрыв был произведен на значительной высоте над коралловым островом, так, чтобы огненный шар не касался поверхности земли, то выпадение радиоактивных веществ в районе испытаний было бы менее значительным.

II.27. Конечно, могут возникнуть такие особые условия, при которых местное выпадение радиоактивных веществ окажется значительным даже в случае воздушного взрыва. Если, например, пойдет дождь во время взрыва или вскоре после него, капли дождя увлекут с собой радиоактивные частицы. Так случилось во время испытания под названием «Эйбл», проведенного у Бикини в июле 1946 г., когда ядерная бомба с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* была взорвана на высоте нескольких сот метров над поверхностью воды. Через 2—3 часа после взрыва в этом районе пошел дождь; было обнаружено, что капли дождя радиоактивны, однако степень радиоактивности дождя в данном случае была сравнительно небольшой.

Ударная волна

II.28. Сразу же после взрыва возникает волна сильного сжатия, которая распространяется от огненного шара во все стороны (рис. II.28); это и есть **ударная волна** (явления, связанные с воз-

никновением ударной волны, будут подробно рассмотрены ниже), которая является непосредственной причиной разрушающего действия воздушного взрыва. Фронт ударной волны быстро удаляется от огненного шара и напоминает движущуюся стену сильно сжатого воздуха. Через 10 секунд после взрыва ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн *т*, когда огненный шар достигает своих максимальных размеров (диаметр равен около 2 *км*), фронт

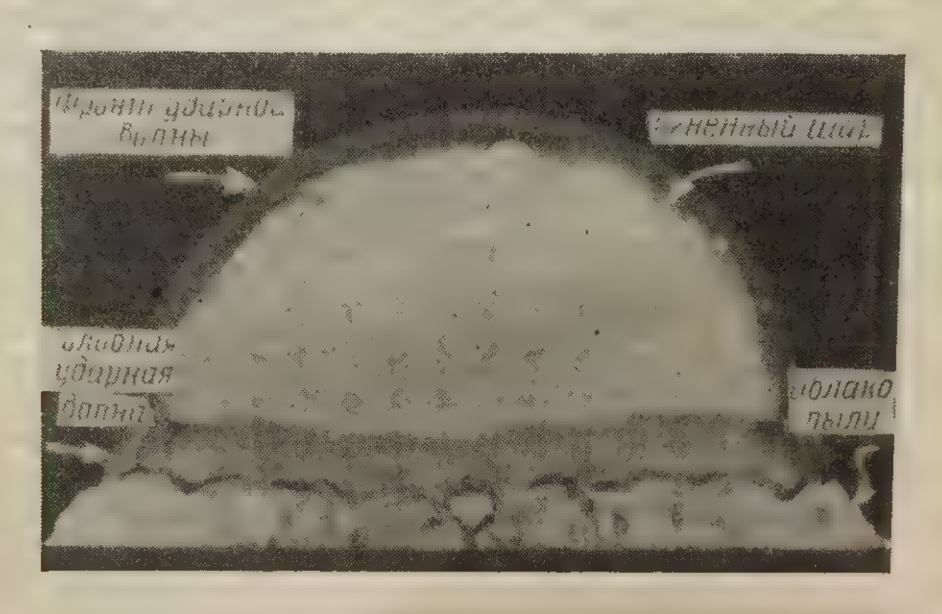


Рис. II.28. Слабо светящийся фронт ударной волны виден вблизи границ полусферического огненного шара вскоре после того, как он оторвался от последнего

ударной волны находится приблизительно на расстоянии 4,8 *км* от его границ. За 50 секунд после взрыва, когда огненный шар перестает быть видимым, ударная волна проходит расстояние около 19 *км*. В это время ее скорость составляет около 345 *м/сек*, что несколько больше, чем скорость звука на уровне моря.

II.29. Ударяясь о поверхность земли, ударная волна отражается аналогично тому, как отражается звуковая волна, образуя эхо. Отраженная ударная волна способна производить разрушения так же, как и прямая (падающая). На некотором расстоянии от эпицентра взрыва у поверхности земли (воды) отраженная волна сливается с падающей; это расстояние зависит главным образом от высоты и мощности взрыва. Явление слияния падающей и отраженной волн получило название **эффекта Маха**, а образующаяся при этом сложная волна называется **головной ударной** волной **(волной Маха)**. Избыточное давление (величина давления сверх атмосферного) во фронте головной ударной волны, как правило, почти в два раза больше, чем во фронте падающей ударной волны.

II.30. При воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* (см. § II.47) эффект образования головной ударной волны начинается приблизительно через 5 секунд после взрыва вдоль линии, напоминающей окружность и отстоящей от эпицентра на расстоянии около 2 *км*. Здесь под эпицентром подразумевается точка на поверхности земли (воды), расположенная непосредственно под (или над) центром взрыва.

II.31. В первые мгновения после возникновения головной ударной волны высота ее фронта небольшая, но с продвижением от эпицентра взрыва эта высота увеличивается. В то же время избыточное давление головной ударной волны, как и падающей волны, уменьшается, так как энергия волны уменьшается, а движущийся фронт охватывает все бóльшую и бóльшую площадь. Спустя 40 секунд после взрыва ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, когда головная ударная волна уже находится на расстоянии около 16 *км* от эпицентра, избыточное давление уменьшается приблизительно до 0,07 *кг/см²* [1].

II.32. Расстояние от эпицентра взрыва, на котором начинается образование головной ударной волны, изменяется в зависимости от высоты взрыва. Например, как видно из рис. II.28, во время испытаний под названием «Тринити» (взрыв был произведен на небольшой высоте в Аламогордо в штате Нью-Мексико) головная ударная волна образовалась на расстоянии нескольких метров от поверхности светящейся области. Наоборот, при очень высоком воздушном взрыве головная ударная волна почти не образуется.

II.33. При ядерном взрыве, кроме потоков воздуха, направленных от периферии к центру и вверх вслед за поднимающейся светящейся областью (§ II.10), возникает также движение масс воздуха, связанное с распространением ударной волны. Максимальная скорость масс воздуха на сравнительно близких от эпицентра расстояниях может достигнуть нескольких сот километров в час; даже на расстоянии более 10 *км* от места взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* максимальная скорость ветра может превысить 110 *км/час*. Ясно, что такие сильные ветры способны значительно увеличить разрушения, вызываемые действием ударной волны воздушного взрыва.

Световое излучение

II.34. Одновременно с образованием огненного шара начинается испускание светового излучения. Так как температура огненного шара очень высока, то испускаются в этот момент ультрафиолетовые (имеющие короткую длину волны), видимые и

---

[1] Нормальное атмосферное давление на уровне моря составляет 1,033 *кг/см²*.

инфракрасные (длинноволновые) лучи. Вследствие поглощения светового излучения слоем воздуха, находящимся в непосредственной близости от огненного шара (см. § II.76 и далее), температура поверхности огненного шара изменяется несколько необычным образом. В то время как температура внутри огненного шара падает постепенно, температура на его поверхности в течение небольшой доли секунды снижается резко. Затем температура поверхности огненного шара («видимая температура») снова повышается. При

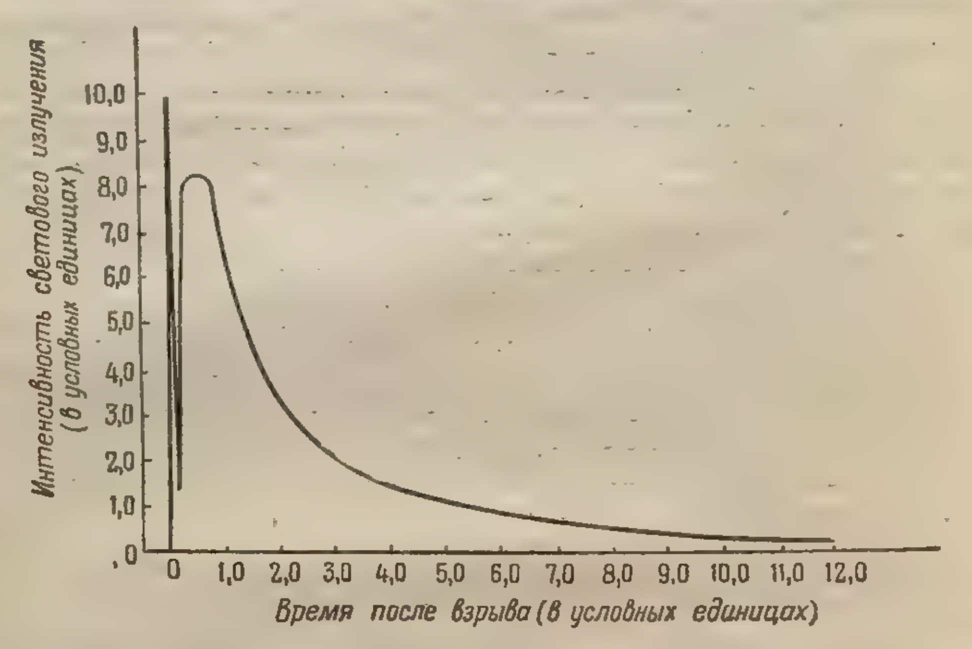


Рис. II.35. Кривая, иллюстрирующая испускание светового излучения двумя импульсами

этом повышение температуры происходит за более длительный промежуток времени, после чего она падает уже плавно (см. рис. II.92). Другими словами, огненный шар в своем развитии проходит через два температурных импульса на его поверхности (или две фазы) [1]. Первый импульс имеет весьма малую продолжительность, тогда как второй продолжается в течение значительно более длительного времени. Подобное явление происходит при всех ядерных взрывах, причем с увеличением мощности взрыва увеличивается и продолжительность каждого импульса.

II.35. В соответствии со скачками температуры на поверхности огненного шара световое излучение испускается им также двумя импульсами (рис. II.35). В первом импульсе, который при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* длится около одной десятой доли секунды, температура огненного шара очень высокая,

---

[1] В нашей специальной литературе термину «температурный импульс» соответствует выражение «фаза развития светящейся области». (*Прим. ред.*)

поэтому значительная часть светового излучения в этом импульсе представляет собой ультрафиолетовые лучи. Умеренные дозы ультрафиолетовых лучей могут вызвать ожоги кожи с образованием болезненных пузырей; небольшие дозы их могут вызвать покраснение кожи. Все же по ряду причин первый импульс светового излучения в большинстве случаев не представляет особой опасности в отношении ожогов кожи: во-первых, в первом импульсе испускается лишь около 1% всего светового излучения, так как этот импульс длится весьма непродолжительное время; во-вторых, ультрафиолетовые лучи сильно ослабляются воздухом, так что доза этих лучей на некотором расстоянии от места взрыва может оказаться сравнительно небольшой. Кроме того, ультрафиолетовые лучи, испускаемые в первом импульсе, по-видимому, могут оказать значительное воздействие на кожу человека лишь на таких расстояниях, в пределах которых другие виды ядерной радиации являются значительно более опасными.

II.36. Совершенно по-иному происходит испускание светового излучения во втором импульсе, который длится несколько секунд и включает в себя около 99% всей лучистой энергии, выделяемой при ядерном взрыве. Поскольку в этом импульсе световое излучение испускается при более низкой температуре, чем в первом, то бо́льшая часть излучения, достигающего поверхности земли, состоит из видимых и инфракрасных (невидимых) лучей. Именно это излучение является основной причиной ожогов различной степени, которые при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* могут быть получены при отсутствии укрытия на расстоянии около 20 *км* и более. Как будет показано в главе VII, для бомб большей мощности увеличивается и радиус поражения. Световое излучение, испускаемое во второй фазе, может при определенных условиях вызвать также пожары.

Начальная ядерная радиация

II.37. Как указывалось в главе I, взрыв ядерной бомбы сопровождается испусканием нейтронов, гамма-лучей, альфа- и бета-частиц. Почти все нейтроны и часть гамма-лучей испускаются в процессе деления. Другими словами, эти излучения возникают одновременно с ядерным взрывом. Часть нейтронов, освобождаемых в процессе деления, немедленно поглощается (захватывается) ядрами атомов различных веществ, имеющихся в бомбе; такой захват обычно тоже сопровождается мгновенным испусканием гамма-лучей. Остальная часть гамма-лучей и все бета-частицы испускаются в течение некоторого периода времени по мере радиоактивного распада продуктов деления. Точно так же альфа-частицы испускаются вследствие радиоактивного распада урана (или плутония), не подвергшегося делению во время взрыва.

II.38. Под начальной ядерной радиацией обычно подразумеваются излучения, испускаемые как огненным шаром, так и радиоактивным облаком в течение первой минуты после взрыва. Эта радиация включает в себя поток нейтронов и гамма-лучей, испускаемых почти мгновенно, а также поток гамма-лучей, испускаемых радиоактивными продуктами деления, находящимися в поднимающемся облаке. Следует отметить, что начальная ядерная радиация включает в себя также альфа- и бета-частицы, однако ими можно пренебречь, так как эти частицы легко поглощаются и максимальная длина их пробега не превышает нескольких метров.

II.39. Время испускания начальной ядерной радиации первоначально было принято равным 1 мин. Это время было определено (с известной степенью произвольности) на основе следующих соображений. Гамма-лучи, испускаемые в процессе деления урана или распада продуктов деления, поглощаются воздухом; при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* радиус их поражающего действия составляет около 3,2 *км*. Другими словами, гамма-лучи, источник которых находится на высоте более 3,2 *км*, не окажут вредного воздействия на объекты, находящиеся на поверхности земли. Следовательно, когда облако взрыва поднимается на высоту 3,2 *км*, ядерная радиация оказывает незначительное воздействие. Поскольку на эту высоту облако взрыва поднимается в течение приблизительно одной минуты, это время и было принято за продолжительность испускания начальной ядерной радиации.

II.40. Приведенный в предыдущем параграфе простой расчет был произведен на основе характеристик бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*. Для более мощного ядерного заряда максимальный радиус поражающего действия гамма-лучей больше, чем указанная выше величина. Однако при этом и скорость подъема облака взрыва больше. Точно так же для взрыва меньшей мощности радиус действия гамма-лучей будет меньше, при этом соответственно будет меньше и скорость подъема облака. Следовательно, продолжительность испускания начальной ядерной радиации может быть принята одна и та же, равная примерно 1 мин., независимо от мощности ядерного взрыва.

II.41. Для термоядерных реакций, приведенных в § I.55, ядерная радиация обусловливается в основном только нейтронами, образующимися непосредственно при этих реакциях. Правда, в процессе этих реакций образуются также альфа-частицы (ядра гелия), но они имеют очень малую длину пробега. Часть образующихся нейтронов вылетает из сферы реакции, а остальные захватываются ядрами атомов различных веществ, имеющихся в бомбе. Те нейтроны, которые захватываются делящимися веществами, могут вызвать деление ядер с освобождением новых нейтронов и испусканием гамма-лучей, как это происходит при взрыве обычной

урановой (плутониевой) бомбы. Захват нейтронов, не сопровождаемый делением ядер, обычно приводит к испусканию гамма-лучей. Таким образом, начальная ядерная радиация при ядерном взрыве, основанном как на реакции деления, так и на реакции синтеза (термоядерная реакция), состоит в основном из нейтронов и гамма-лучей. Соотношение этих двух типов излучений при взрыве такой бомбы несколько иное, чем в том случае, когда вся выделяемая энергия обусловлена только реакцией деления, но для решения практических вопросов этим различием можно пренебречь.

Другие явления, сопровождающие ядерный взрыв

II.42. Следует упомянуть о некоторых интересных явлениях, связанных с ядерным взрывом, происходящим в воздухе, хотя эти явления не имеют отношения к поражающему действию взрыва. Вскоре после взрыва на некотором расстоянии от огненного шара возникает фиолетовое свечение, которое особенно заметно ночью или при слабом дневном свете. Это свечение продолжается в течение значительного времени; оно отчетливо видно близ верхней части облака взрыва. Полагают, что это свечение возникает в результате ряда сложных процессов, происходящих под действием гамма-лучей на азот и кислород воздуха.

II.43. Одним из ранних явлений, сопровождающих при определенных условиях ядерный взрыв, является образование конденсационного облака. Его иногда называют облаком Вильсона (в камере Вильсона учеными искусственно создаются аналогичные условия, приводящие к образованию облака). В главе III будет показано, что за фронтом воздушной ударной волны (волны сжатия) следует волна разрежения. В фазе сжатия ударной волны температура воздуха повышается, а в фазе разрежения — понижается. При сравнительно низком давлении ударной волны температура воздуха в период фазы разрежения может стать ниже той, которую он имел до периода фазы сжатия. Если при этом воздух содержит значительное количество паров воды, то происходит их конденсация с образованием облака.

II.44. Конденсационное облако, которое образовалось при испытании под названием «Эйбл», проведенном у атолла Бикини в 1946 г., показано на рис. II.44. Поскольку бомба была взорвана близ поверхности воды, воздух был почти полностью насыщен парами воды, и условия благоприятствовали образованию конденсационного облака. На фотоснимке видно, что облако образуется на некотором расстоянии от огненного шара. Это объясняется тем, что ударная волна должна пройти известное расстояние, прежде чем давление в фазе сжатия уменьшится до величины, при которой во время фазы разрежения происходит понижение температуры воздуха, достаточное для конденсации водяных паров. За это время фронт ударной волны продвинется еще дальше от огненного

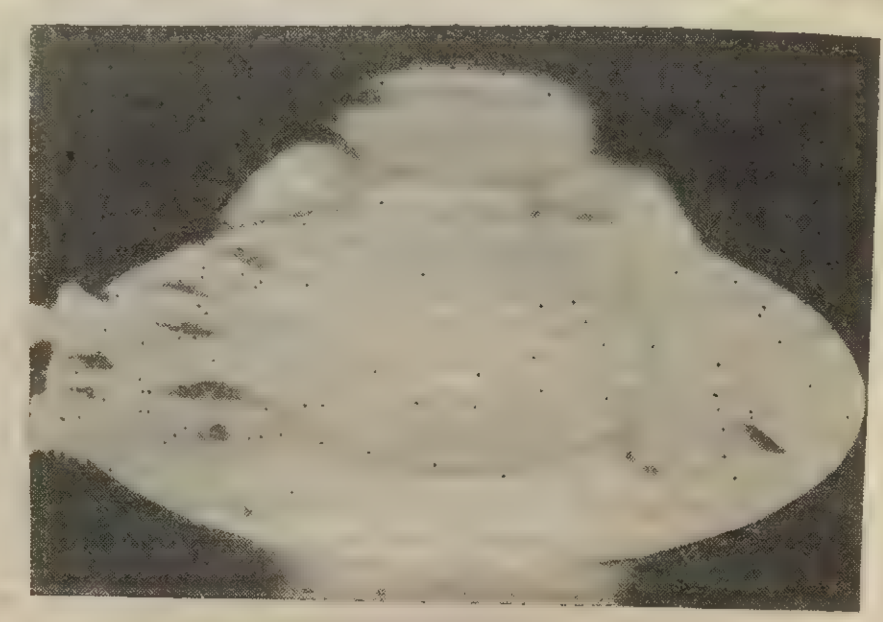


Рис. II.44. Конденсационное облако, образовавшееся при воздушном взрыве над водой

шара, как это видно на фотоснимке, на котором изображен светлый диск на поверхности воды, образовавшийся в результате прохождения ударной волны.

II.45. Так как для образования конденсационного облака необходима относительно высокая влажность воздуха, то наиболее благоприятные условия для образования такого облака возникают при ядерных взрывах, произведенных над поверхностью воды или под водой. Так было, например, во время испытаний у атолла Бикини в 1946 г.; конденсационное облако начало образовываться через 1—2 секунды после взрыва и исчезло приблизительно через 1 секунду, когда воздух снова нагрелся и капельки воды испари-

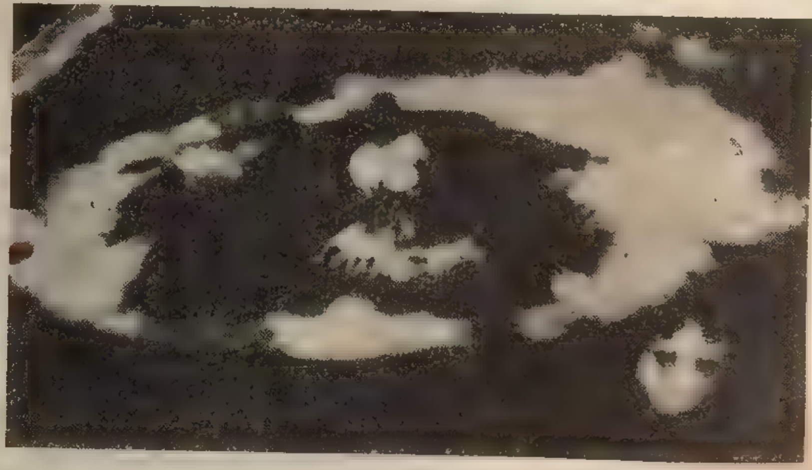


Рис. II.45. Последняя стадия развития конденсационного облака, образовавшегося при воздушном взрыве над водой

лись. Облако, имевшее вначале вид купола, приняло форму кольца, как видно на рис. II.45, а затем исчезло.

II.46. Поскольку конденсационное облако образуется после того, как большая часть лучистой энергии освобождена, оно оказывает мало влияния на интенсивность светового излучения. Правда, густые облака и особенно задымление могут ослабить световое излучение, однако конденсационное облако в этом отношении имеет небольшое значение, поскольку оно образуется очень поздно, да и плотность его небольшая.

Стадии развития воздушного ядерного взрыва

II.47. На рисунках II.47а—II.47д показаны наиболее существенные моменты из всего сказанного относительно воздушного ядер-



Рис. II.47а. Развитие воздушных взрывов ядерных зарядов с тротиловыми эквивалентами 20 тыс. *т* и 1 млн. *т* (соответственно через 0,5 сек. и 1,8 сек. после взрыва)

Сразу же после ядерного взрыва в воздухе образуется сильно раскаленный светящийся газообразный шар. Поскольку температура огненного шара очень высока, он испускает световое (тепловое) излучение, способное вызывать на значительном расстоянии ожоги на теле и воспламенение возгораемых материалов. Ядерные реакции, вызывающие взрыв и радиоактивный распад продуктов деления, сопровождаются вредной ядерной радиацией (испускание гамма-лучей и нейтронов), также имеющей большой радиус действия в воздухе. Вскоре после взрыва в воздухе возникает разрушающая ударная волна, быстро удаляющаяся от огненного шара.

К моменту времени, указанному на рисунке, огненный шар почти достигает своих максимальных размеров, как это видно из следующей таблицы:

	Диаметр огненного шара в *м* при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом	
	20 тыс. *т*	1 млн. *т*
К указанному моменту времени	440	1890
Максимальная величина	470	2160

Фронт ударной волны к указанному на рисунке моменту времени находится от огненного шара на расстоянии 225 *м* для ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* и немногим более 800 *м* для заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*.

ного взрыва. На этих рисунках показаны стадии развития отдельных процессов, сопровождающих типичный воздушный взрыв, т. е. взрыв на такой высоте, при которой он может причинить максимально возможный ущерб городу средних размеров. Для ядерных взрывов имеют силу некоторые простые законы, известные под на-

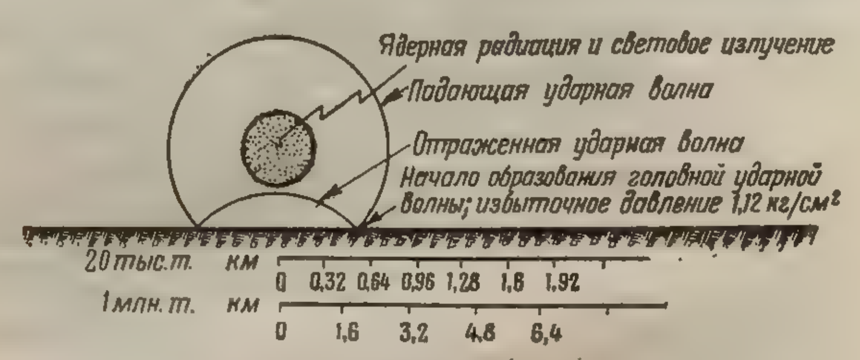


Рис. II.47б. Развитие воздушных взрывов ядерных зарядов с тротиловыми эквивалентами 20 тыс. *т* и 1 млн. *т* (соответственно через 1,25 секунды и 4,6 секунды после взрыва)

При падении ударной волны на поверхность земли возникает отраженная ударная волна. На определенном расстоянии от эпицентра взрыва, зависящем от высоты взрыва и мощности бомбы, падающая ударная волна сливается с отраженной и образует у поверхности земли одну, более сильную волну, называемую головной волной.

Время и расстояние, на котором начинается образование головной ударной волны, показаны в следующей таблице:

Тротиловый эквивалент	Время после взрыва, *сек*	Расстояние от эпицентра, *км*
20 тыс. *т*	1,25	0,56
1 млн. *т*	4,6	2,08

В момент образования головной ударной волны избыточное давление у поверхности земли составляет 1,12 *кг/см²*. Огненный шар продолжает испускать значительные количества ядерной радиации и светового излучения.

званием законов подобия (см. главу III), пользуясь которыми можно на одних и тех же рисунках показать время и расстояния, относящиеся к взрывам двух различных мощностей, например 20 тыс. *т* и 1 млн. *т*.

II.48. Следует указать, что на рисунках протекающие процессы представлены схематично и что в целом то, что показано на них, нельзя наблюдать при взрыве. Все, что человеческий глаз видит (если он не ослепляется от яркой вспышки),— это огненный шар и облако взрыва. (Здесь не говорится о конденсационном облаке, поскольку для его образования необходима высокая влажность;

во всяком случае оно практического значения не имеет.) Человек может почувствовать прохождение ударной волны; его кожа чув-

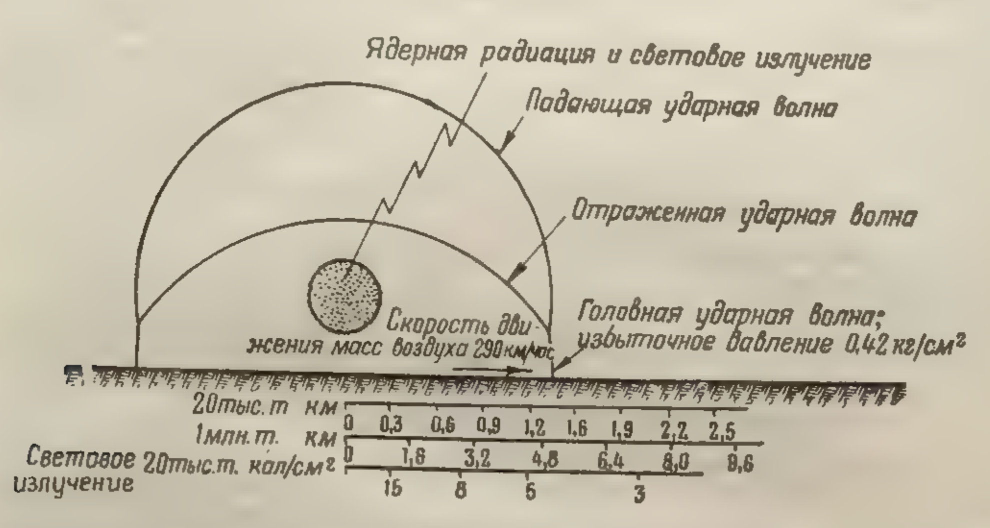


Рис. II.47в. Развитие воздушных взрывов ядерных зарядов с тротиловыми эквивалентами 20 тыс. *т* и 1 млн. *т* (соответственно через 3 секунды и 11 секунд после взрыва)

С течением времени фронт головной ударной волны удаляется от эпицентра и растет по высоте. Расстояния от эпицентра взрыва и высоты фронта головной ударной волны для указанных на рисунке промежутков времени приведены в следующей таблице:

Тротиловый эквивалент	Время после взрыва, *сек*	Расстояние от эпицентра, *км*	Высота фронта головной ударной волны, *м*
20 тыс. *т*	3	1,4	56
1 млн. *т*	11	5,2	200

Избыточное давление во фронте головной ударной волны составляет 0,42 *кг/см²*, а скорость ветра непосредственно за этим фронтом — около 300 *км/час*.

Ядерная радиация все еще оказывает сильное поражающее действие. Однако через 3 секунды после взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* огненный шар остывает настолько, что световое излучение не имеет важного значения, хотя температура огненного шара остается еще очень высокой. Общее количество энергии светового излучения в калориях, приходящееся на 1 *см²* на различных расстояниях от эпицентра воздушного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*, показано на нижней шкале рисунка (более подробно об этом говорится в главе VII). Огненный шар, образовавшийся при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, через 11 секунд после взрыва все еще продолжает испускать значительное количество энергии светового излучения; испускание светового излучения происходит в течение более длительного промежутка времени, чем при взрыве менее мощной бомбы.

ствительна к световому излучению, но ни один из органов чувств человека не может ощущать умеренных доз ядерной радиации. В то же время ядерная радиация очень большой мощности вызывает зуд и пощипывание кожи.

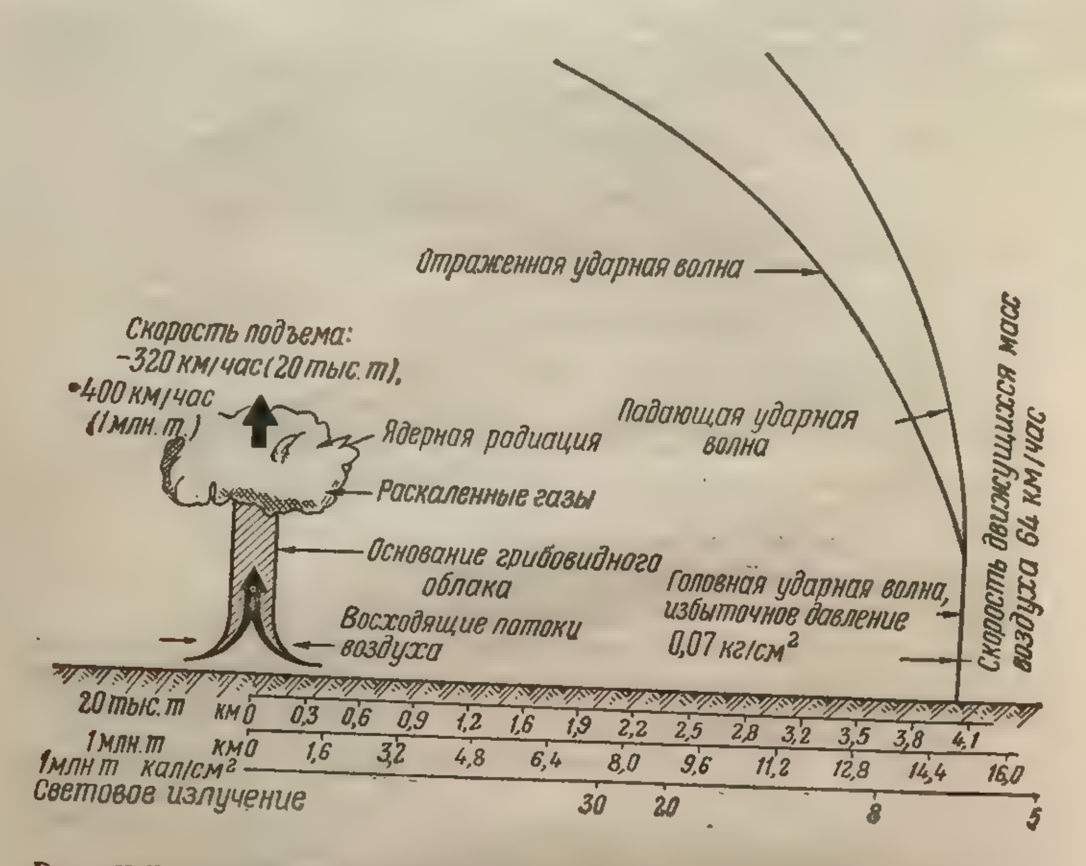


Рис. II.47г. Развитие воздушных взрывов ядерных зарядов с тротиловыми эквивалентами 20 тыс. *т* и 1 млн. *т* (соответственно через 10 секунд и 37 секунд после взрыва)

Через 10 секунд после взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* фронт головной ударной волны находится на расстоянии 4 *км* от эпицентра, а для заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* через 37 секунд после взрыва этот фронт находится на расстоянии 15,2 *км* от эпицентра. В обоих случаях избыточное давление во фронте головной ударной волны составляет около 0,07 $кг/см^2$, а скорость движущихся за фронтом масс воздуха — около 64 *км/час*. При этих условиях разрушающее действие ударной волны почти полностью исчерпано: она может лишь выбить стекла или повредить штукатурку. Световое излучение даже при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* уже не имеет важного значения. Данные о полной энергии светового излучения, получаемой объектами на различных расстояниях от эпицентра такого взрыва, приведены на нижней шкале рисунка. Ядерная радиация, которая обусловливается главным образом гамма-излучением, испускаемым продуктами деления, оказывает существенное поражающее действие; свечение огненного шара прекращается, но его температура все еще очень высока, и он, подобно воздушному шару, быстро поднимается вверх. Вслед за поднимающимся огненным шаром окружающий воздух втягивается внутрь и вверх примерно так, как в дымоходной трубе. Вследствие этого возникают сильные восходящие потоки воздуха, которые поднимают с земли пыль и другие твердые частицы; последние образуют основание („ножку") характерного грибовидного облака.

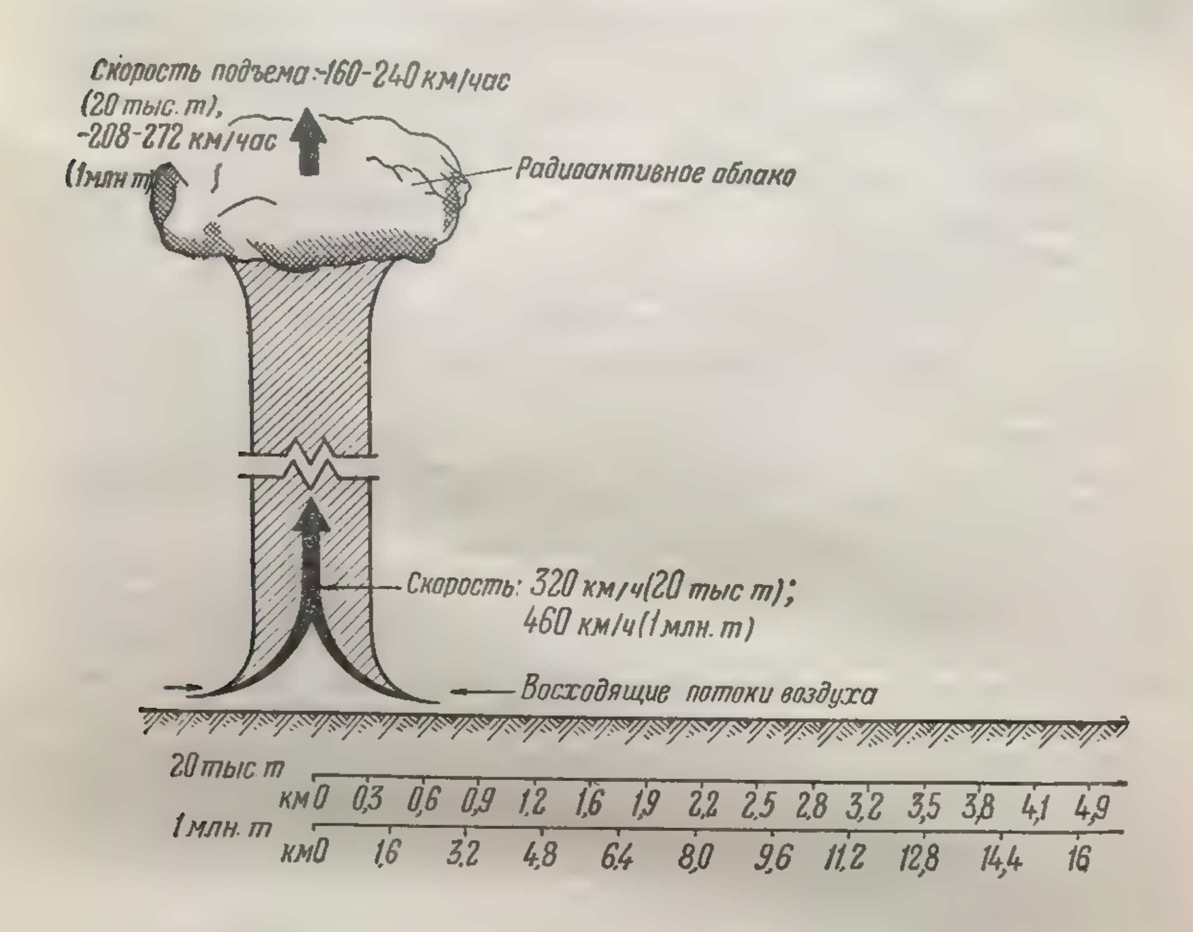


Рис. II.47д. Развитие воздушных взрывов ядерных зарядов с тротиловыми эквивалентами 20 тыс. *т* и 1 млн. *т* (соответственно через 30 секунд и 110 сек. после взрыва)

Горячие продукты взрыва продолжают подниматься вверх, одновременно расширяясь и охлаждаясь. В результате этого газообразные продукты деления и остатки бомбы конденсируются и образуют облако, состоящее из частиц высокой радиоактивности. Восходящие потоки воздуха, обладая скоростью 320 *км/час* и более, продолжают поднимать столб пыли, который в дальнейшем соединяется с радиоактивным облаком и придает последнему характерную грибовидную форму.

За указанное время облако взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* поднимается на высоту около 2,4 *км*, а бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* — на высоту 11 *км*. В течение примерно 10 минут нижняя часть „головки“ грибовидного облака достигает высоты 8—24 *км* в зависимости от мощности взрыва. Верхняя часть облака поднимается еще выше. В конце концов частицы, составляющие облако, рассеиваются ветром, и если в данное время атмосферные осадки не выпадают, то сколько-нибудь значительного радиоактивного заражения местности в районе взрыва не происходит.

Хотя к этому времени облако взрыва все еще сильно радиоактивно, на поверхности земли ядерная радиация оказывает незначительное поражающее действие. Это происходит потому, что облако взрыва уже поднялось на большую высоту, а активность продуктов деления уменьшилась в результате естественного радиоактивного распада.

ПОДВОДНЫЙ ВЗРЫВ

Явления, сопровождающие подводный ядерный взрыв

II.49. Подводные взрывы сопровождаются характерными для этого вида взрыва явлениями. Эти явления проявляются различно в зависимости от мощности взрыва, глубины, на которой происходит взрыв, глубины и площади самого водоема. Приводимое ниже описание подводного взрыва основано на данных, полученных при испытании «Бейкер», проведенном у атолла Бикини в 1946 г. Во время этого испытания бомба с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* была взорвана значительно ниже поверхности воды в лагуне глубиной 60 *м*. В 1955 г. ядерный взрыв был произведен глубоко под водой, однако данные, полученные от этого испытания, для гражданской обороны интереса не представляют.

II.50. При подводном ядерном взрыве образуется огненный шар, но его размеры, вероятно, меньше, чем при воздушном взрыве. Во время испытания «Бейкер» вода в районе взрыва была освещена светом, исходившим от огненного шара. Имевшиеся на поверхности воды естественные волны исказили общую картину и не позволили ясно видеть очертания огненного шара; картина взрыва получилась такой, какой она представляется при наблюдении через матовое стекло. Освещенность воды продолжалась в течение нескольких тысячных долей секунды и исчезла, как только огненный шар, представлявший собой пузырь раскаленных и сильно сжатых газов, достиг поверхности воды. После того как газы прорвались наружу и охладились, огненного шара не стало больше видно.

II.51. Еще находясь под водой, газовый пузырь быстро расширяется и образует ударную волну. След этой волны по мере ее продвижения во все стороны от места взрыва заметен на сравнительно спокойной поверхности воды по быстро распространяющемуся кольцу более светлого цвета, чем окружающая вода. Данное явление, иногда называемое «слик» (slick) [1], можно наблюдать на фоне спокойной поверхности воды; это объясняется тем, что при прохождении ударной волны с поверхности выбрасываются в воздух частицы воды, в результате чего поверхность воды, которой коснулась ударная волна, кажется светлее остальной поверхности.

II.52. Вслед за появлением светлого кольца, но до образования конденсационного облака, над центром взрыва выбрасывается

[1] Slick — след ударной волны (морской термин), переводится, как спокойная поверхность воды, образовавшаяся в результате воздействия масляной пленки или в результате резкого поворота кормы корабля. В советской специальной литературе для указанного явления (образование следа) принят термин «кавитация». В данном случае кавитация означает вскипание воды под влиянием разряжения». (*Прим. ред.*)



Рис. II.52. Купол из брызг воды, образовавшийся над местом подводного взрыва

столб водяных струй и брызг, называемый **водяным куполом** (рис. II.52); это происходит вследствие отражения ударной волны от поверхности. Первоначальная скорость подъема воды пропорциональна давлению в падающей ударной волне, поэтому скорость подъема является наибольшей непосредственно над центром взрыва. Таким образом, скорость подъема воды над цен-

тром взрыва максимальная и продолжительность подъема наибольшая; с удалением от центра взрыва эта скорость понижается. Поэтому по мере того как вода поднимается вверх, образующие внешней поверхности водяного купола становятся круче. Подъем воды прекращается под действием силы тяжести и сопротивления воздуха. Полное время и максимальная высота подъема зависят от мощности и глубины взрыва. При взрыве на

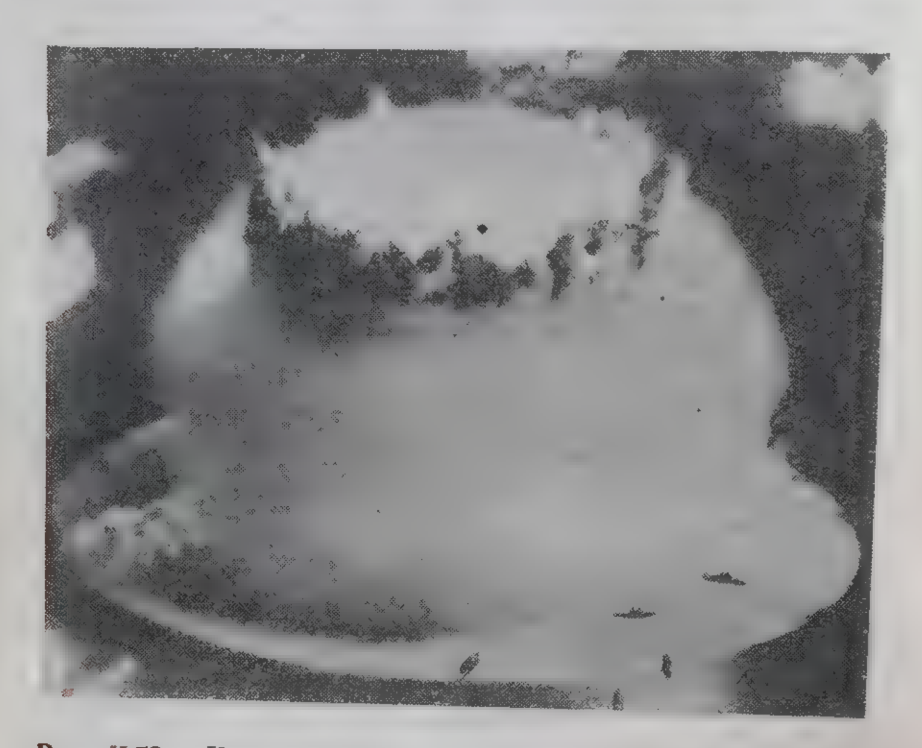


Рис. II.53а. Конденсационное облако, образовавшееся после взрыва на небольшой глубине под водой (на поверхности воды можно видеть след, оставляемый двигающейся ударной волной)

очень большой глубине водяной купол, возможно, совсем не образуется.

II.53. При ядерном взрыве, произведенном на небольшой глубине, газовый пузырь до подъема на поверхность воды почти не изменяется. В момент его появления на поверхности газы, увлекая за собой некоторое количество воды, вырываются в атмосферу. Ударная волна (часть энергии подводной ударной волны) прорывается через поверхность воды в воздух, и поскольку влажность последнего велика, создаются благоприятные условия для образования конденсационного облака (рис. II.53а). Как только давление в газовом пузыре падает, вода устремляется в образовавшуюся полость. Возникающие вслед за этим сложные явления приводят к образованию полого водяного цилиндра или полого столба воды,

называемого султаном; содержащиеся в газовом пузыре радиоактивные продукты выходят через этот полый цилиндр и образуют сверху облако, напоминающее кочан цветной капусты (рис. II.53б).

II.54. При подводном взрыве (испытание «Бейкер»), произведенном на небольшой глубине у атолла Бикини, водяной купол начал формироваться примерно через 4 *мсек* после взрыва. Первоначальная скорость его подъема составила около 750 *м/сек*, но вследствие сопротивления воздуха и действия силы тяжести она

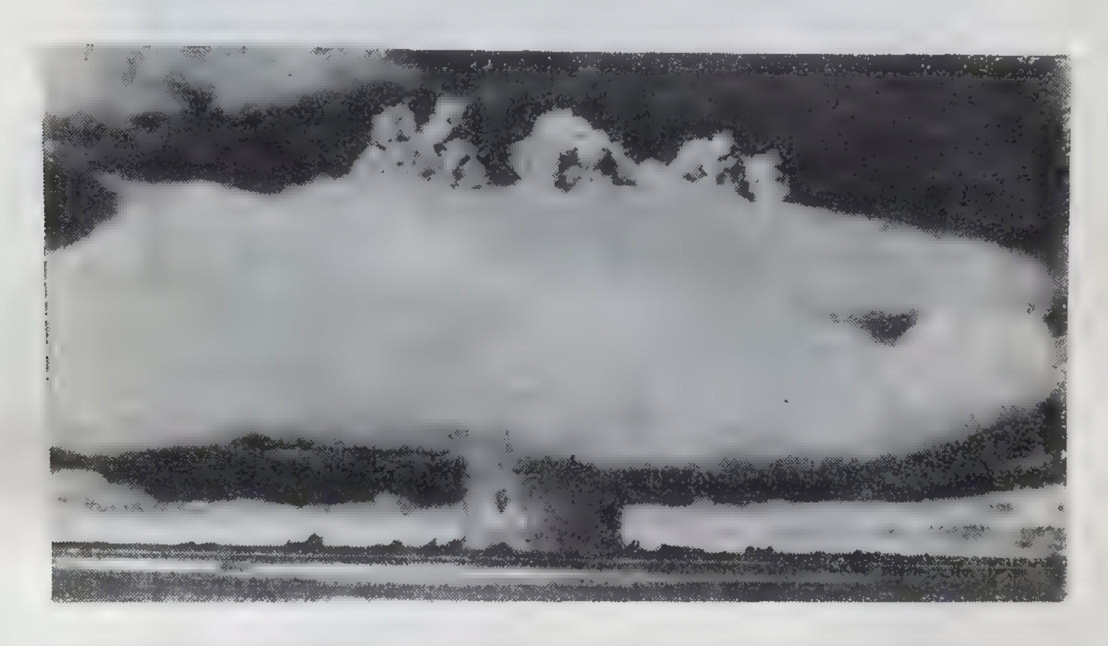


Рис. II.53б. Образование полого столба воды („султана") при подводном взрыве; верхняя часть столба окружена конденсационным облаком, находящимся в последней стадии развития

резко снизилась. Через несколько миллисекунд раскаленный газовый пузырь достиг поверхности воды и начал образовываться султан, быстро достигший уровня купола. Максимальная высота полого султана, через который газы прорвались наружу, не могла быть точно определена, так как его верхняя часть была окутана облаком взрыва (рис. II.54). По-видимому, высота султана составляла около 1800 *м*, а его наибольший диаметр — около 600 *м*. Толщина стенок султана, вероятно, составляла около 90 *м*, при этом было поднято вверх около 1 млн. *т* воды.

II.55. Облако, напоминавшее по своей форме кочан цветной капусты, скрывавшее верхнюю часть султана, содержало продукты деления, вещества, из которых состояла бомба, а также большое количество воды в виде мельчайших капелек. Кроме того, имеются данные о том, что в облаке находились также частицы грунта, поднятые со дна лагуны; на палубах кораблей, находившихся на некотором расстоянии от места взрыва, был обнаружен

известковый осадок, который, по-видимому, выпал из радиоактивного облака. Это облако имело диаметр около 1800 *м* и до того, как рассеяться, поднялось на высоту около 3 *км*. Это значительно меньше, чем высота, на которую поднимается облако воздушного взрыва.



Рис. II.54. Радиоактивное облако и базисная волна (в начальной стадии), образовавшиеся при подводном взрыве. Вода в столбе начинает падать вниз

II.56. В результате подводного взрыва на поверхности воды образуется целая серия волн, двигающихся во все стороны от центра взрыва. Через 11 секунд после взрыва у Бикини первая волна имела наибольшую высоту 28 *м* и находилась на расстоянии около 300 *м* от эпицентра взрыва. Эта волна двигалась с большой скоростью, а за нею следовали другие волны. На расстоянии 6,6 *км* от эпицентра взрыва наиболее высокой была девятая по счету волна, имевшая высоту 1,8 *м*.

Базисная волна

II.57. При подводном взрыве (испытание «Бейкер») наблюдалось, что при обратном падении столба воды и брызг образовалась гигантская волна (или облако) в виде тумана, которая пол-

ностью скрыла основание столба воды (см. рис. II.54). Это облако, быстро движущееся от столба, получило название **базисной волны**. Базисная волна по существу представляет собой плотное облако, состоящее из капелек воды и напоминающее водяную пыль у основания Ниагарского водопада (или других высоких водопадов), однако базисная волна обладает свойством текучести, как если бы она состояла из однородной жидкости.



Рис. II.58. Поздняя стадия развития базисной волны, образовавшейся при подводном взрыве

II.58. У Бикини базисная волна начала образовываться через 10—12 секунд после взрыва. Поднимаясь вверх, она быстро достигла высоты 275 *м*, одновременно распространяясь в радиальном направлении с начальной скоростью около 30 *м/сек*. Базисная волна распространялась вначале с большой скоростью, затем ее движение замедлилось: через 4 минуты после взрыва наружный ее диаметр составлял 5,6 *км*, высота ее достигала 550 *м*. На этой стадии базисная волна начала постепенно отделяться от поверхности воды и смешиваться с облаком взрыва, а также с обычными атмосферными облаками (рис. II.58).

II.59. Примерно через 5 минут после взрыва базисная волна приняла вид слоисто-кучевых облаков, которые в конечном итоге достигли толщины в несколько тысяч метров (рис. II.59). Из этих облаков, двигавшихся по ветру, началось выпадение дождя в виде крупных капель, которое продолжалось около часа; в начальной

стадии этот дождь был более сильным за счет дополнительного выпадения мелких капелек воды из облака взрыва.

II.60. С точки зрения поражающего действия ядерного оружия значение базисной волны заключается в том, что она может оказаться сильно радиоактивной как за счет продуктов деления, имеющихся в ней, так и за счет радиоактивности капель воды, выпадающих из облака взрыва. Вследствие своей радиоактивности базисная волна может представить серьезную опасность на рас-

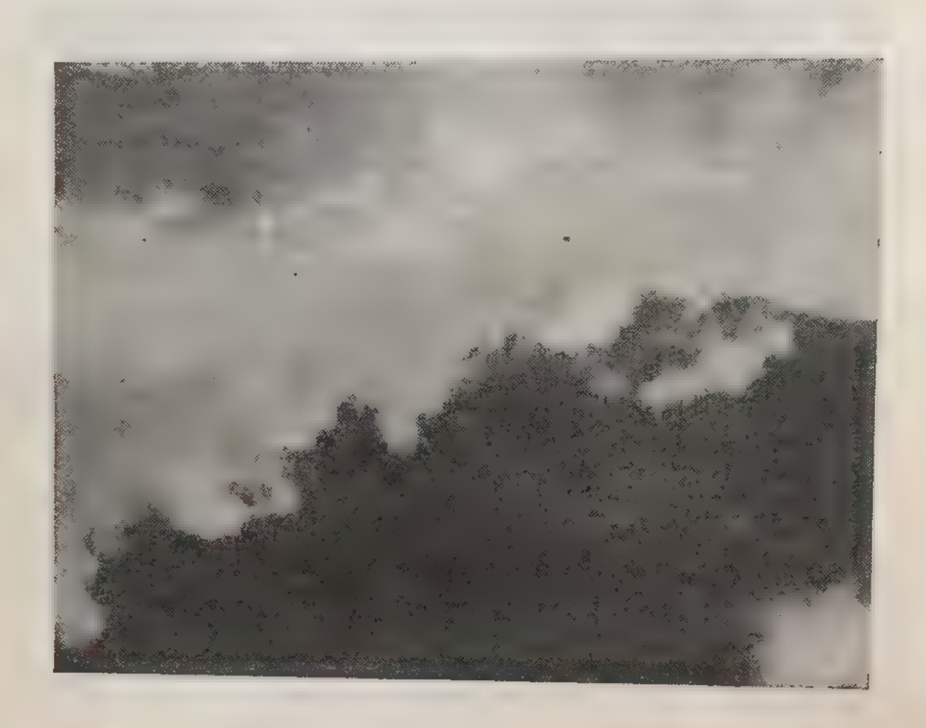


Рис. II.59. Последняя стадия развития базисной волны

стоянии нескольких километров от места взрыва, особенно по направлению ветра (см. гл. IX). Любой объект, над которым проходит базисная волна, может быть заражен радиоактивными веществами, поскольку на него попадают капельки воды, содержащие продукты деления. Таким образом, базисная волна и дождь, выпадающий из облака взрыва, являются источником остаточной ядерной радиации, возникающей после подводного ядерного взрыва.

II.61. Условия, необходимые для образования базисной волны, точно не установлены. Во всяком случае, базисная волна образуется, когда возникает султан значительных размеров. Вероятность образования такого султана увеличивается с увеличением глубины взрыва до некоторой определенной (умеренной) величины.

II.62. При достаточно глубоком подводном ядерном взрыве пузырь раскаленных газов разрушается в массе возмущенной воды до достижения им поверхности водоема. В этом случае водяной столб и водяной купол оказываются небольшими, и поэтому базисная волна вовсе не образуется или бывает небольшой. Распад газового пузыря на большое число малых пузырей, перемешиваемых с водой, приводит к образованию радиоактивной пены. При достижении ею поверхности воды образуется небольшой туман, радиоактивные вещества при этом в основном остаются в воде. Таким образом, при глубоком подводном взрыве не образуется радиоактивного облака, следовательно, отсутствует и сильное радиоактивное выпадение. Но все же отложение пены с высокой степенью радиоактивности на ближайшем берегу может представлять опасность.

Световое излучение и ядерная радиация

II.63. Пока огненный шар находится под водой, почти все испускаемое им световое излучение поглощается окружающей средой. Когда же раскаленные газы достигают поверхности и расширяются, происходит настолько быстрое их охлаждение и температура почти мгновенно падает настолько, что световое излучение уже не имеет существенного значения. Из этого следует, что при подводном взрыве световым излучением как поражающим фактором (для людей) и источником возникновения пожаров можно пренебречь.

II.64. Вероятно также, что бо́льшая часть нейтронов и гамма-лучей, испускаемых в течение короткого промежутка времени, соответствующего начальной стадии развития взрыва, тоже будет поглощена водой. Но когда огненный шар достигает поверхности и раскаленные газы вырываются наружу, гамма- и бета-излучения, испускаемые продуктами деления, становятся источником начальной ядерной радиации; в дальнейшем источником этой радиации становятся продукты деления (и вещества с наведенной радиоактивностью), имеющиеся в водяном столбе, облаке взрыва и базисной волне, которые образуются в течение нескольких секунд после взрыва.

II.65. Однако, как было указано выше, выпадающий из облака взрыва дождь и базисная волна являются источником также и остаточной ядерной радиации. Таким образом, при подводном взрыве еще труднее провести разграничение между начальной и остаточной ядерной радиацией, чем для случая воздушного взрыва. Начальная ядерная радиация постепенно переходит в остаточную радиацию, которая оказывает свое воздействие еще в течение продолжительного периода времени после взрыва.

Стадии развития подводного взрыва на небольшой глубине

II.66. На рисунках II.66а — II.66д схематически представлены стадии развития явлений, сопровождающих неглубокий подводный взрыв ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 100 тыс. т.

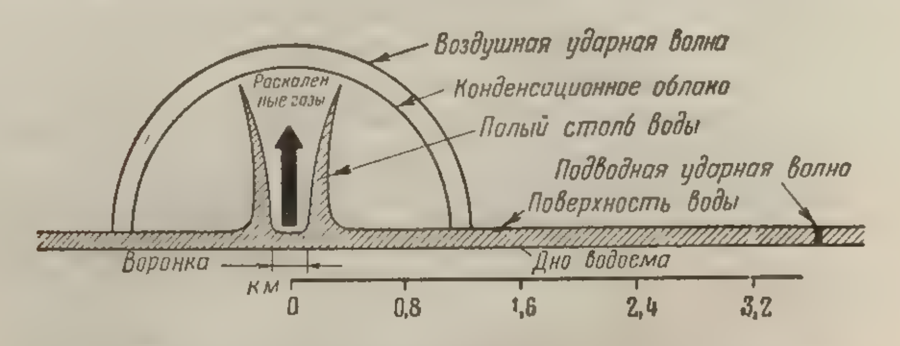


Рис. II.66а. Развитие неглубокого подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 2 секунды после взрыва)

Когда ядерная бомба взрывается под водой, образуется пузырь раскаленных газов, который прорывается через поверхность, если взрыв происходит на небольшой глубине. В результате взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* вверх выбрасывается полый столб воды, который через 2 секунды достигает высоты 1500 *м*. Раскаленные газы вырываются в атмосферу через центральную полую часть водяного столба.

Подводная ударная волна (волна сжатия), создаваемая взрывом, распространяется в радиальном направлении с большой скоростью и через 2 секунды удаляется от эпицентра на расстояние более 3,2 *км*. В результате расширения газового пузыря образуется также воздушная ударная волна, но она движется значительно медленнее подводной, так что ее фронт через 2 секунды оказывается на расстоянии около 1,3 *км* от эпицентра.

Вскоре после прохождения воздушной ударной волны образуется куполообразное облако, состоящее из капелек воды, называемое конденсационным облаком, которое сохраняется в течение 1—2 секунд. Хотя это явление и представляет научный интерес, оно, по-видимому, не имеет значения с точки зрения применения ядерного оружия или защиты от него.

При подводном взрыве на средних или больших глубинах почти все световое излучение и значительная часть начальной ядерной радиации поглощаются водой.

Эти данные дополняют сведения о подводном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. т, приведенные выше. На рисунках показаны главным образом все явления, сопровождающие подводный взрыв, которые можно наблюдать визуально, за исключением фронта ударной волны и ядерной радиации.

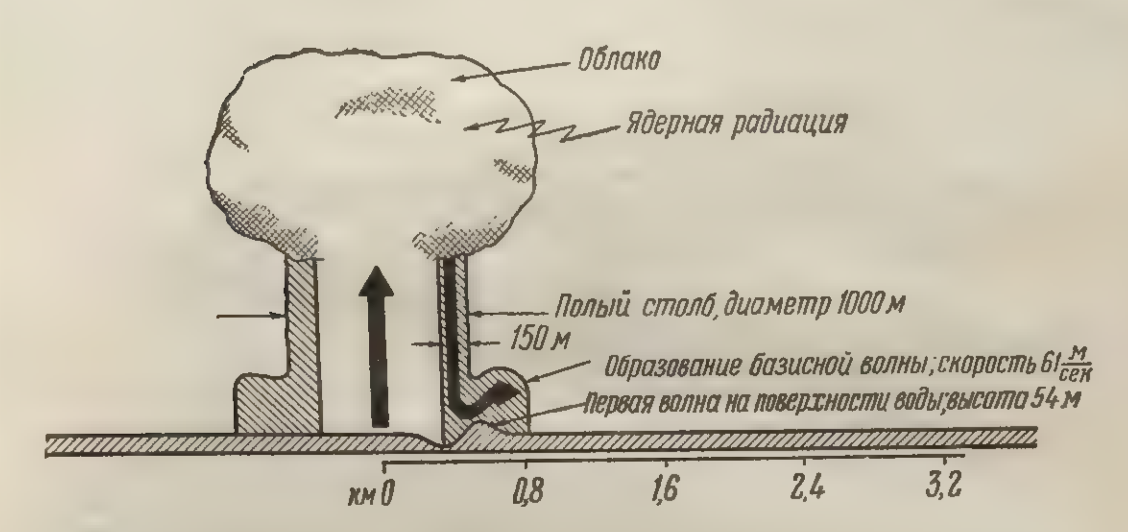


Рис. II.66б. Развитие неглубокого подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 12 секунд после взрыва)

Спустя 12 секунд после подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* диаметр полого водяного столба составляет около 1 *км*, толщина его стенок — около 150 *м*. Газообразные продукты взрыва, выходя наружу через центральную полую часть столба, расширяются и конденсируются, образуя облако взрыва, имеющее форму кочана цветной капусты и частично закрывающее верхнюю часть столба. Облако сильно радиоактивно из-за наличия в нем продуктов деления. Так как облако находится на значительной высоте, поражающее действие радиации у поверхности воды незначительное.

Через 10—12 секунд после подводного взрыва на небольшой глубине вода, из которой состоит столб, падая обратно, достигает поверхности и образует вокруг столба кольцо сильно радиоактивного тумана, называемое базисной волной. Это кольцеобразное облако очень быстро распространяется в радиальном направлении вдоль поверхности воды, имея начальную скорость около 60 *м/сек* (218 *км/час*).

В результате возмущения, вызванного подводным взрывом, на поверхности воды образуются крупные волны. За 12 секунд после взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* первая из этих волн проходит расстояние 540 *м* от эпицентра, и ее высота от впадины до гребня составляет 54 *м*.

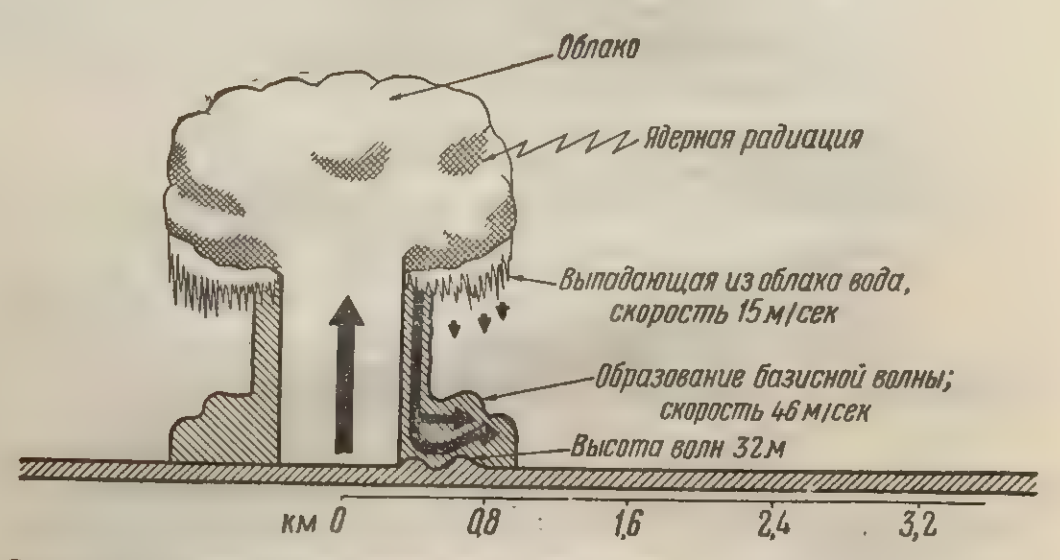


Рис. II.66в. Развитие неглубокого подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т*. (через 20 секунд после взрыва)

В то время как вода и водяная пыль, образующие столб, продолжают опускаться, облако базисной волны развивается, поднимаясь вверх и двигаясь от эпицентра взрыва по поверхности воды. Через 20 секунд после взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* высота базисной волны составляет около 300 *м*, а ее фронт находится примерно в 800 *м* от эпицентра. В это время базисная волна движется от центра взрыва со скоростью, приблизительно равной 46 *м/сек* (160 *км/час*).

Примерно в это же время из атомного облака начинает выпадать большое количество воды, что иногда называют массовым выпадением воды. Начальная скорость падения составляет около 15 *м/сек*; вследствие выпадения воды из столба его диаметр уменьшается до 600 *м*. Через 20 секунд после взрыва первая волна на поверхности воды находится на расстоянии 600 *м* от эпицентра, а высота ее составляет около 32 *м*.

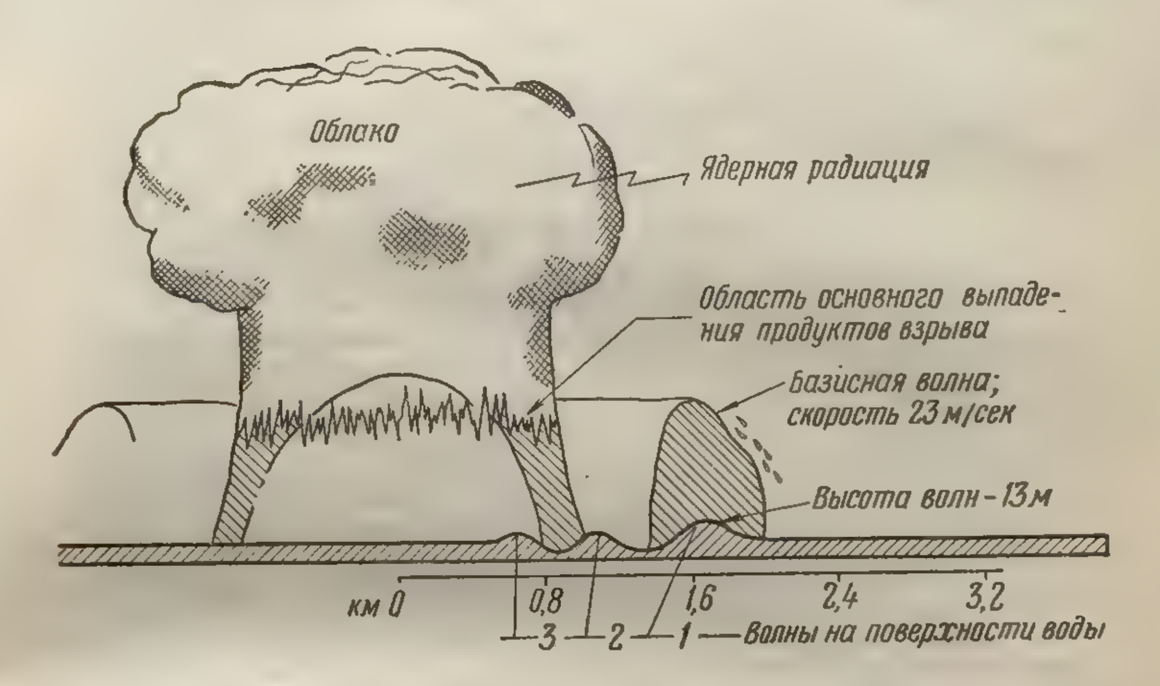


Рис. II.66г. Развитие неглубокого подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 1 минуту после взрыва)

Спустя одну минуту после подводного взрыва вода, падая из атомного облака, достигает поверхности, образуя область основного выпадения радиоактивных продуктов из облака взрыва. Между облаком взрыва и поверхностью воды образуется сплошное кольцо из воды и тумана.

Примерно в это же время базисная волна отделяется от основания столба и приобретает кольцевую форму. Высота облака, образовавшегося из базисной волны, составляет теперь 400 *м*, а ее фронт, двигаясь со скоростью примерно 23 *м/сек* (83 *км/час*), находится на расстоянии в 1,9 *км* от эпицентра взрыва.

Вследствие радиоактивности водяных капель, составляющих базисную волну, последняя может оказать поражающее действие на людей.

В этот момент на поверхности воды образуется уже несколько волн; первая волна, имеющая высоту 13 *м*, находится примерно на расстоянии 1,6 *км* от эпицентра взрыва.

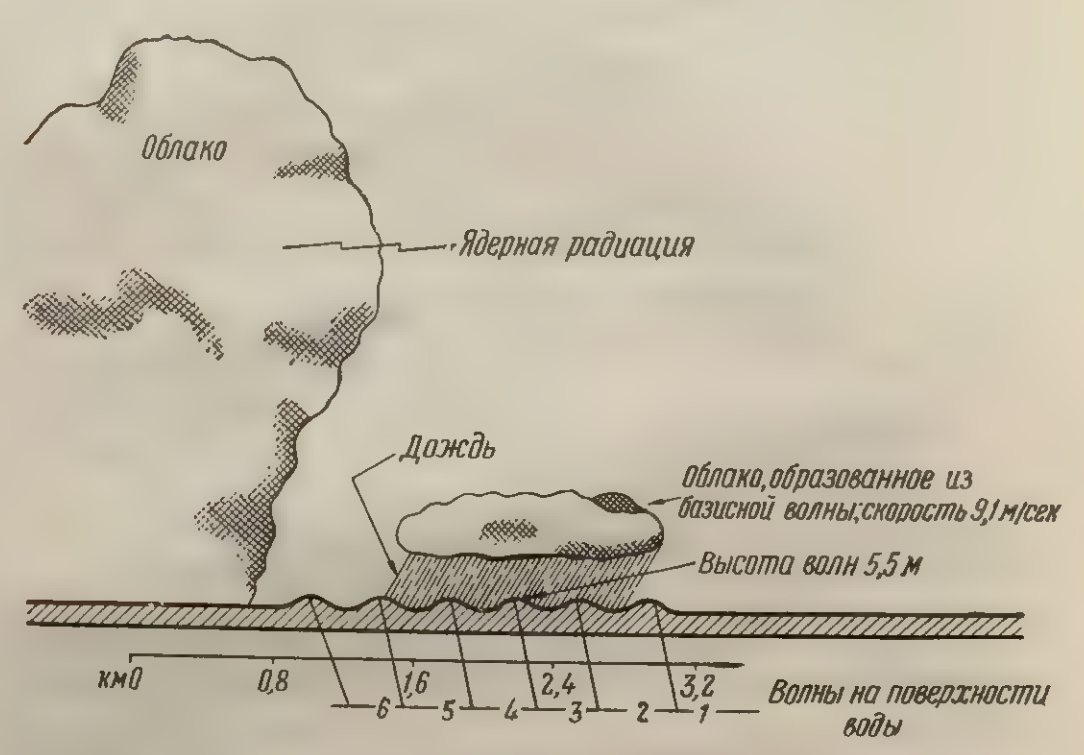


Рис. II.66д. Развитие неглубокого подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 2,5 минуты после взрыва)

Через 2,5 минуты после подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* фронт базисной волны находится примерно в 3,2 *км* от эпицентра, а высота облака, образовавшегося из нее, составляет около 600 *м*. Наибольшее расстояние, на которое облако базисной волны распространилось от эпицентра через 4 минуты после взрыва, составляет примерно 4 *км*, т. е. диаметр облака составляет около 8 *км*. Время 4 минуты, по-видимому, соответствует отрыву облака базисной волны от поверхности воды.

Отделение облака от поверхности воды объясняется несколькими причинами: увеличением высоты, разрежением облака и выпадением из него крупных капель воды в виде дождя. Вследствие естественного радиоактивного распада продуктов деления, выпадения дождя и разрежения облака интенсивность ядерной радиации, испускаемой базисной волной через 2,5 минуты после взрыва, составляет только 1/20 интенсивности, проявляющейся через 1 минуту после взрыва.

Выпадение воды в виде брызг и капель из водяного столба и из конденсационного облака приводит к образованию сплошной массы тумана (облака), соприкасающейся с поверхностью воды. Эта масса сливается с базисной волной, которая расширяется и увеличивается в высоту, а также с естественными облаками на небе и в конечном счете рассеивается ветром.

ПОДЗЕМНЫЙ ВЗРЫВ

Явления, сопровождающие подземный взрыв

II.67. В том случае когда ядерный заряд взрывается под землей, образующийся огненный шар состоит из сильно раскаленных газов, находящихся под высоким давлением. Эти газы включают в себя



Рис. II.67. Подземный взрыв, произведенный на небольшой глубине

также вещества испарившегося грунта и невзорванных остатков бомбы.

Если взрыв произошел на умеренной глубине, огненный шар можно увидеть в момент прорыва его через поверхность (до того как он будет скрыт облаком пыли). Когда газы вырываются из-под земли, они поднимают с собой в воздух значительное количество грунта, скальных пород и обломков в виде цилиндрического столба, аналогичного столбу воды при подводном взрыве. При подземном экспериментальном взрыве на небольшой глубине, произведенном в 1951 г. в штате Невада, столб имел форму опрокинутого конуса, расширявшегося с высотой; при этом происходил радиальный выброс грунта (рис. II.67). В результате выброса грунта на поверхности земли образовалась воронка значительного размера.

II.68. На основании результатов испытаний, проведенных в штате Невада, можно считать, что если бы сброшенная с самолета бомба с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* проникла в песчаный грунт на глубину 15 *м* и после этого взорвалась, то образовавшаяся воронка имела бы глубину около 58 *м*, а диаметр — 430 *м*. Это значит, что с поверхностного слоя земли было бы выброшено около 10 млн. *т* грунта и горных пород. Объем воронки и масса материала, выброшенного силой взрыва, будут увеличиваться примерно пропорционально энергии ядерного взрыва. Мелкие частицы грунта, опускаясь на землю, могут, как это будет указано ниже, образовать базисную волну.

II.69. Быстрое расширение пузыря сильно сжатых и раскаленных газов, образовавшихся при подземном взрыве, вызывает появление в грунте волны сжатия. Действие этой волны подобно действию сейсмической волны, возникающей при землетрясении средней интенсивности; различие состоит в том, что в данном случае источник возмущения находится близко к поверхности, а не на большой глубине. Это различие, по-видимому, вызывает с увеличением расстояния от источника возмущения более быстрое падение давления в волне сжатия, вызванной ядерным взрывом, чем в сейсмической волне. Кроме того, как выделяющаяся энергия, так и длительность действия волны сжатия при ядерном взрыве меньше, чем при землетрясении.

II.70. Как и в случае подводного взрыва, часть энергии, освобождающейся при подземном взрыве, расходуется на образование воздушной ударной волны. Доля энергии, выделяющейся в виде воздушной ударной волны, зависит главным образом от глубины взрыва. Чем на большую глубину проникает в грунт (до взрыва) бомба, тем меньшая доля энергии волны сжатия передается в воздух.

Базисная волна и радиоактивное выпадение

II.71. При падении на землю породы, поднятой при подземном взрыве в виде столба пыли, во многих случаях будет образовываться расширяющееся облако, состоящее из мелких частиц грунта, аналогичное базисной волне, наблюдавшейся при испытании «Бейкер», проведенном у атолла Бикини.

На рис. II.71 изображена начальная стадия развития базисной волны. Этот рисунок во многих отношениях похож на рис. II.58. Базисная волна, состоящая из частиц пыли, распространяется от центра взрыва и в последующем относится ветром. В конечном счете частицы оседают, производя радиоактивное заражение в обширном районе. Площадь зараженного района будет зависеть от глубины взрыва, характера грунтов и атмосферных условий, а также от тротилового эквивалента ядерного заряда. Считается, что

местность с сухими песчаными грунтами особенно благоприятна для образования базисной волны при подземном взрыве.

II.72. Атомное облако, образующееся при подземном взрыве, будет неизбежно содержать очень большое количество веществ грунта и различных горных пород; соответственно произойдет и сильное



Рис. II.71. Образование базисной волны при подземном взрыве

выпадение зараженного материала. Более крупные частицы, поднятые вверх взрывом, первыми достигнут поверхности земли, и поэтому ими будет заражена местность вблизи эпицентра взрыва. Более мелкие частицы в течение некоторого времени будут оставаться взвешенными в воздухе и могут быть отнесены ветром на значительное расстояние, прежде чем они осядут на землю.

Световое излучение и ядерная радиация

II.73. Явления, связанные с испусканием светового излучения и ядерной радиации, при подземном взрыве протекают так же, как и при подводном взрыве. Как правило, световое излучение будет почти полностью поглощено массой грунта, так что оно не будет представлять существенной опасности. Бóльшая часть нейтронов и начального гамма-излучения будет также поглощена, но захват нейтронов различными веществами, имеющимися в грунте, вызовет в них наведенную радиоактивность, которая может оказать существенное поражающее действие. Однако эта радиоактивность

будет составлять небольшую долю остаточного ядерного излучения и будет иметь значение только вблизи эпицентра взрыва. В основном остаточное излучение будет обусловливаться наличием зараженной базисной волны и радиоактивным выпадением.

II.74. По тем же причинам, которые были указаны в § II.64 для случая подводного взрыва, начальная радиация при подземном

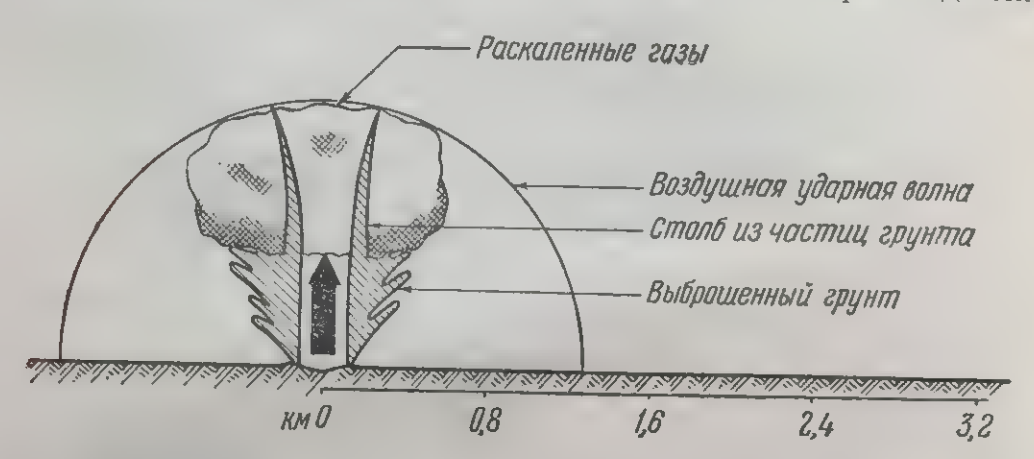


Рис. II.75а. Развитие неглубокого подземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 2 секунды после взрыва)

Когда ядерный взрыв происходит на небольшой глубине под землей, огненный шар прорывается через поверхность земли спустя доли секунды после взрыва. В этот момент сильно раскаленные и сжатые газы освобождаются и увлекают с собой в воздух в виде полого столба огромные массы грунта и скальных пород.

В случае взрыва на небольшой глубине столб имеет форму опрокинутого конуса, расширяющегося с высотой; при этом происходит радиальный выброс грунта. Когда горячие газы охлаждаются и конденсируются, образуется облако, имеющее высокую радиоактивную зараженность и содержащее большое количество грунта.

В результате выброса из поверхностного слоя земли большого количества грунта образуется воронка.

При взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* на глубине 15 *м* в сухом грунте глубина воронки составляет около 36 *м*, а диаметр — 220 *м*. Вес выброшенного грунта превышает 1 млн. *т*.

Кроме волны сжатия грунта, аналогичной в некоторых отношениях сейсмической волне, образующейся при землетрясении, при взрыве образуется также воздушная ударная волна. Через 2 секунды после взрыва фронт воздушной ударной волны находится примерно в 1,2 *км* от эпицентра.

взрыве постепенно переходит в остаточную. Следовательно, различие между начальной и остаточной радиацией, которое отмечается для воздушного взрыва, при подводном и подземном взрывах является несущественным.

II.75. На рис. II.75а — II.75г показаны стадии развития во времени некоторых явлений, сопровождающих неглубокий подземный взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т*.

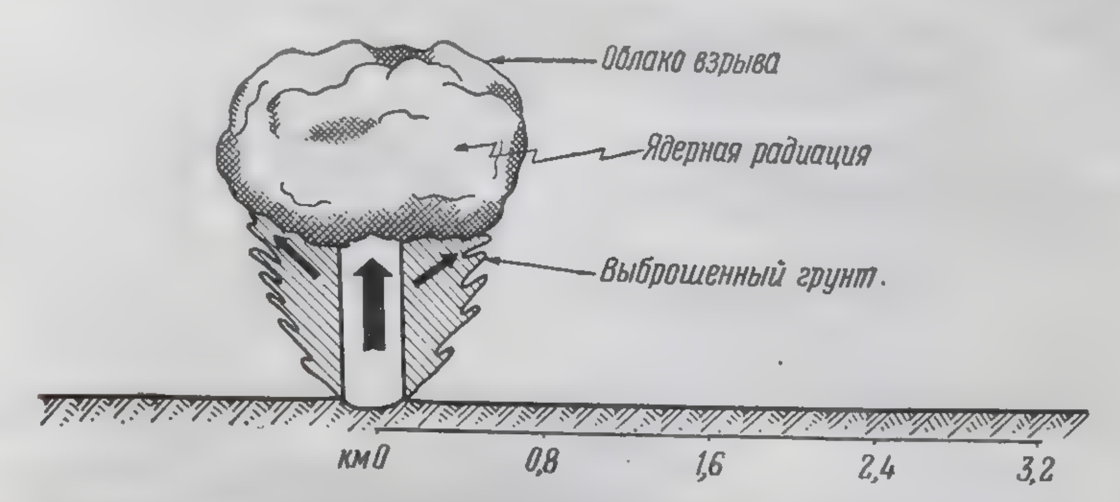


Рис. II.75б. Развитие неглубокого подземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 9 секунд после взрыва)

Атомное облако продолжает расти, испуская интенсивную ядерную радиацию, которая через 9 секунд после взрыва все еще имеет сильное поражающее действие на поверхности земли.

В это же время наиболее крупные частицы выброшенного в воздух грунта начинают падать на землю.

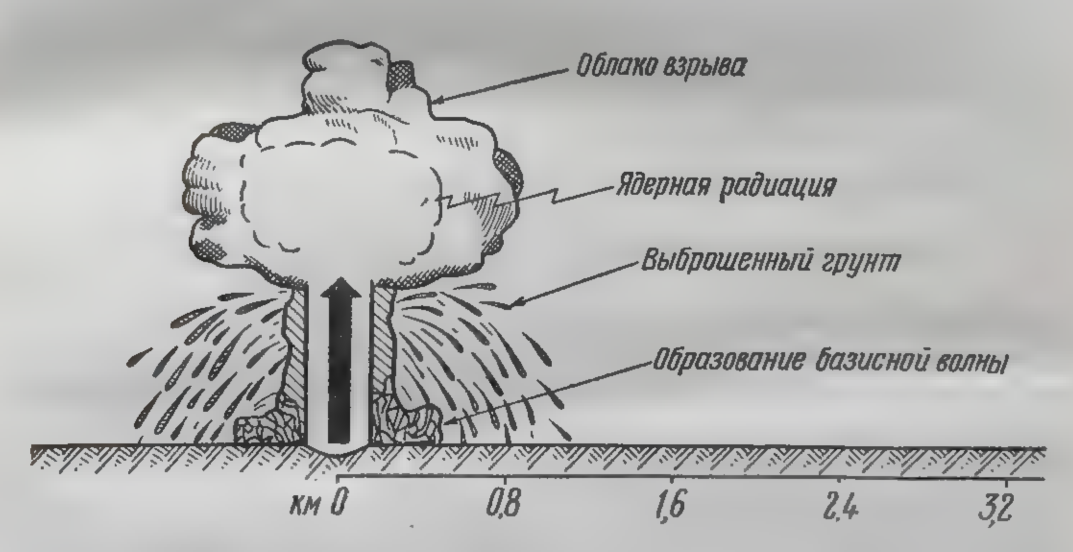


Рис. II.75в. Развитие неглубокого подземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 45 секунд после взрыва)

При обратном падении грунта из столба наиболее мелкие его частицы приобретают высокие скорости и после достижения поверхности земли быстро распространяются во все стороны, образуя базисную волну, аналогичную базисной волне подводного взрыва. Размеры базисной волны, которая обладает высокой радиоактивностью, зависят от многих факторов, и прежде всего от мощности взрыва, глубины взрыва и вида грунта. Считается, что местность с сухим песчаным грунтом будет особенно благоприятствовать образованию базисной волны.

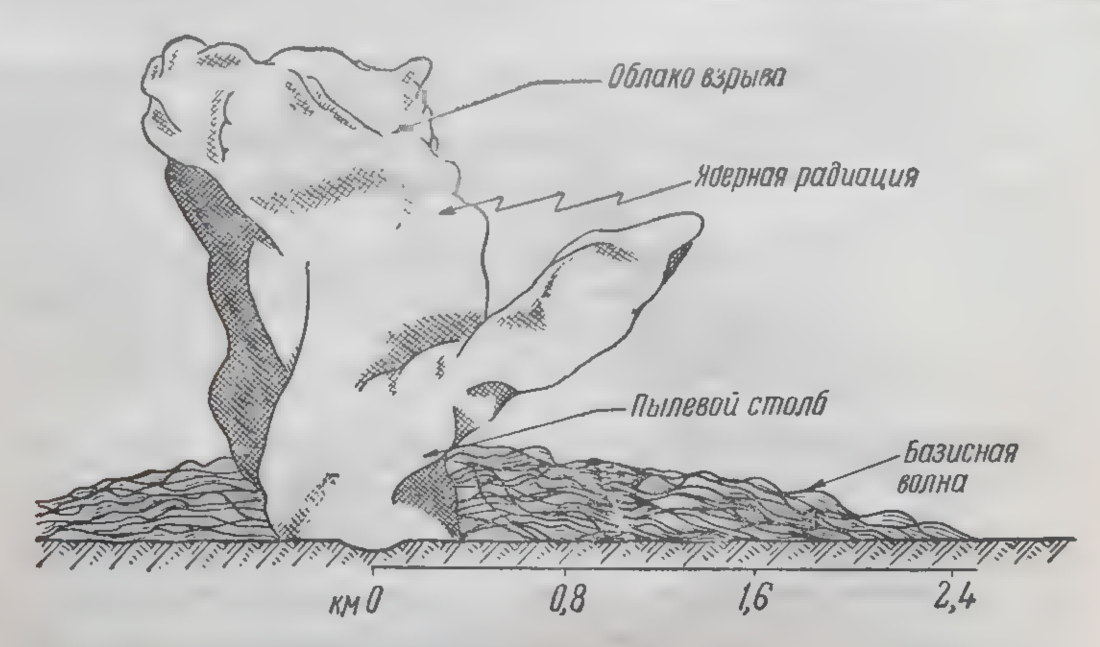


Рис. II.75г. Развитие неглубокого подземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* (через 4,5 минуты после взрыва)

Базисная волна, расширяясь, увеличивает свои размеры по высоте и площади и спустя некоторое время начинает смешиваться с атомным облаком, часть которого опускается и относится в сторону ветром. Со временем радиоактивное облако взрыва рассеивается, но зараженные частицы выпадают на землю в течение нескольких часов, производя опасное заражение в обширном районе, особенно в направлении ветра.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА[1]

Развитие огненного шара при воздушном взрыве

II.76. На самых ранних стадиях образования огненного шара температура во всем его объеме одна и та же. Энергия, освобождаемая в результате деления (или синтеза) ядер, может быстро перераспределяться путем излучения между любыми двумя точками внутри сферы раскаленных газов, и вследствие этого в пределах этой сферы не может быть существенных температурных градиентов. Вследствие однородности температуры в данной сфере она называется **изотермической сферой**, которая на этой стадии тождественна с огненным шаром.

II.77. При расширении огненного шара и возникновении ударной волны ее фронт, как было указано выше, сначала совпадает с поверхностью изотермической сферы. Однако, когда температура падает примерно ниже 300 000° С, скорость движения фронта ударной волны становится больше скорости расширения изотермической сферы. Другими словами, передача энергии ударной волной происходит теперь быстрее, чем путем излучения.

[1] Этот раздел при чтении данной главы может быть опущен.

II.78. Световое излучение представляет собой фотоны, движущиеся со скоростью света; в связи с этим возникает вопрос, почему передача энергии путем излучения происходит медленнее, чем передача энергии ударной волной. Ниже дается следующее упрощенное объяснение этого явления. Вследствие высокой температуры светящейся области большая часть (около 70%) излучения приходится на ультрафиолетовую часть спектра, длины волн в которой менее 1860 Å[1]. В холодном воздухе, через который распространяется излучение, испускаемое увеличивающимся в размерах огненным шаром, оно сильно поглощается, и средняя величина свободного пробега (т. е. среднее расстояние, которое фотон проходит до поглощения каким-либо атомом или молекулой) очень мала — порядка 0,01 *см* или менее.

II.79. Можно считать, что каждый фотон движется со скоростью света в пределах расстояния, равного средней величине свободного пробега. Затем он поглощается атомом, молекулой или ионом газа, как правило, ионами азота или кислорода, входящими в состав воздуха, которые вследствие этого переходят в возбужденное состояние. В течение некоторого времени они остаются в возбужденном состоянии, после чего переходят в основное состояние с более низким уровнем энергии путем испускания фотона. Этот фотон испускается в случайном направлении со скоростью света, чтобы снова быть захваченным атомом или молекулой воздуха, после чего опять испускается фотон и т. д. Вследствие того, что фотоны при длинах волн менее 1860 Å имеют короткий средний свободный пробег, а также ввиду того что фотоны движутся по всевозможным направлениям, обусловленным следующими друг за другом процессами поглощения и испускания, суммарная скорость передачи такого излучения относительно невелика.

II.80. Следует иметь в виду, что такая медленная передача энергии относится только к той части спектра, в которой световые волны имеют наименьшую длину. Для светового излучения с большими длинами волн, т. е. больше чем 1860 Å, доля которого увеличивается по мере охлаждения поверхности огненного шара, средний свободный пробег в воздухе сильно возрастает. Поэтому световое излучение, соответствующее ближней ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областям спектра, распространяется от огненного шара со скоростью света.

II.81. Когда фронт ударной волны отрывается от изотермической сферы, он вызывает сильное сжатие воздуха, в результате чего

---

[1] Ангстрем — единица длины, применяемая в оптике, равная 10^{-8} *см*. (*Прим. ред.*)

температура воздуха повышается и он сильно раскаляется. Огненный шар состоит теперь из двух концентрических областей. Внутренняя (более горячая) область—это изотермическая сфера с однородной температурой. Она окружена слоем светящегося воздуха, нагретого ударной волной, имеющего относительно низкую температуру. Поверхность раздела между очень раскаленным ядром и несколько менее раскаленным внешним слоем называется **фронтом излучения.**

II.82. Явления, описанные выше, представлены схематически на рис. II.82. На серии фотоснимков показаны стадии развития огненного шара, соответствующие различным промежуткам времени после взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*: слева показаны температурные градиенты, а справа — градиенты давления.

Из первых трех рисунков видно, что температура в пределах всего огненного шара однородна и он в этот период совпадает с изотермической сферой. Однородность температуры внутри огненного шара показана горизонтальным направлением температурных линий. На поверхности огненного шара имеется резкий перепад температуры. По мере того как фронт ударной волны отделяется от изотермической сферы, по истечении примерно 0,5 *мсек* начинают образовываться две температурные области. Наружная область огненного шара поглощает излучение, вследствие чего изотермическая сфера невидима. На

0 мсек
0,24 мсек
0,38 мсек
0,52 мсек
0,66 мсек
0,80 мсек
0,94 мсек
90 м
Температура
Давление

Рис. II.82. Изменение температуры и давления в огненном шаре при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*

фотоснимке, следовательно, изображена только внешняя поверхность огненного шара.

II.83. Кривые, изображенные справа на рис. II.82, дают представление о характере изменения давления в огненном шаре.

В начальных (изотермических) стадиях давление однородно во всем объеме шара, но по истечении примерно 0,5 *мсек* фронт ударной волны начинает отделяться от изотермической сферы, о чем свидетельствует несколько более высокое давление вблизи поверхности огненного шара. Немного менее чем через 1 *мсек* ударная волна, имеющая крутой фронт, распространяется на некоторое расстояние, оставив позади изотермическую область. За возрастанием давления в огненном шаре до максимума следует характерный для ударной волны крутой спад давления на его внешней поверхности. Это свидетельствует о том, что внешняя поверхность огненного шара совпадает с фронтом ударной волны.

Между прочим, следует отметить, что на одном из фотоснимков видно, как четко определилась поверхность огненного шара, которая была до этого несколько неровной.

II.84. В течение некоторого времени огненный шар продолжает увеличиваться со скоростью, определяемой распространением фронта ударной волны в окружающем воздухе. В течение этого периода давление во фронте ударной волны непрерывно понижается, так что воздух, через который проходит фронт ударной волны, светится все меньше. В конце концов едва видимый фронт ударной волны уходит вперед от все еще раскаленного огненного шара (см. рис. II.28). Начальная стадия этого явления, которая при

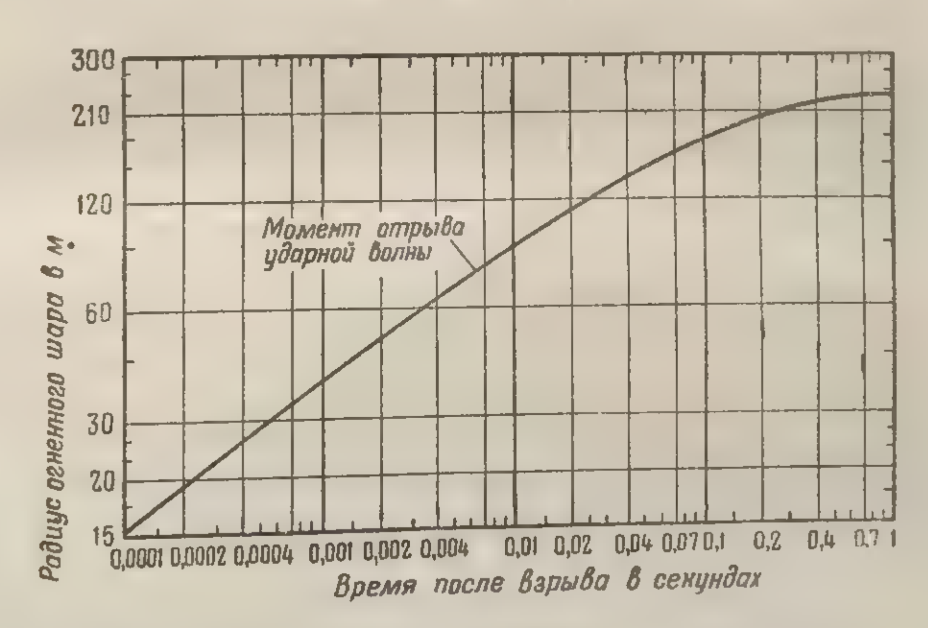


Рис. II.85. Изменение во времени радиуса огненного шара при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*

взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* наступает примерно через 17 *мсек* после взрыва, называется **отрывом.**

II.85. После того как произошел отрыв ударной волны, все еще видимый огненный шар продолжает увеличиваться, но более замедленно. Максимальные размеры будут достигнуты примерно через 1 секунду. На рис. II.85 показан характер увеличения радиуса огненного шара во времени в период приблизительно с 0,1 *мсек* до 1 секунды после взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*. На этом рисунке по обоим осям величины отложены в логарифмическом масштабе, вследствие чего нижняя часть кривой (слева) указывает не на постоянство скорости роста огненного шара, а на ее уменьшение с течением времени. Еще более существенное уменьшение скорости роста огненного шара имеет место после отрыва ударной волны, что заметно по той части кривой, которая приближается к горизонтальному направлению.

Энергия взрыва и размер огненного шара

II.86. Результаты многочисленных испытаний показали, что максимальный размер огненного шара может быть представлен на основании закона подобия в виде уравнения:

$$\frac{R}{R_0}=\left(\frac{W}{W_0}\right)^{2/5},$$

где R — максимальный радиус огненного шара для ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*, а R_0 — известная величина радиуса, относящаяся к эталонной бомбе с тротиловым эквивалентом W_0 тыс. *т*.

II.87. Используя этот закон подобия и учитывая результаты, полученные при различных экспериментальных ядерных взрывах, можно получить соотношение

$$R\,(\text{метры}) = 70\ W^{2/5}, \qquad (\text{II.87.1})$$

из которого можно легко определить максимальный радиус огненного шара для ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*.

II.88. Установлено, что наименьшая высота взрыва, при которой радиоактивное выпадение будет еще незначительным, соответствует радиусу огненного шара во время второго теплового максимума (см. рис. II.92).

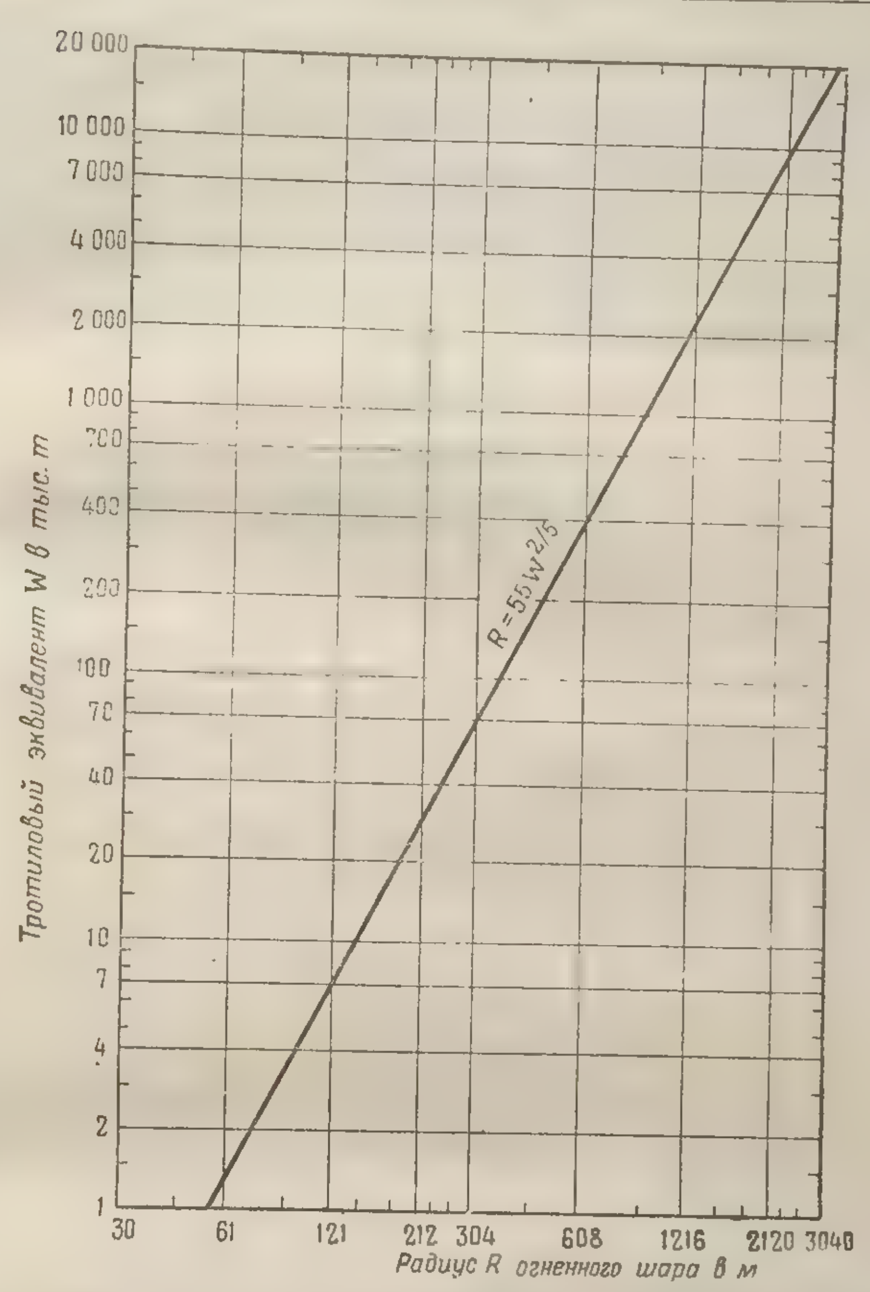


Рис. II.88. **Зависимость радиуса огненного шара от мощности взрыва (к оценке радиоактивного выпадения в районе взрыва)**

Соответствующая формула для ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. $т$ примет вид

$$R\,(\text{метры}) = 55\,W^{2/5}, \qquad \text{(II.88.1)}$$

где R является теперь минимальной высотой взрыва, при которой произойдет незначительное местное радиоактивное выпадение. График, построенный с помощью этого уравнения, изображен на рис. II.88.

Из графика, приведенного на рис. II.88, или выражения II.88.1 можно определить, что радиус огненного шара при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т*, соответствующий моменту второго теплового максимума, составляет 880 *м*. Следовательно, если бомба с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т* взорвана на высоте большей, чем 880 *м*, то следует ожидать, что в большинстве случаев местное радиоактивное выпадение, которое последует за таким взрывом, не будет представлять серьезной опасности.

Температура огненного шара

II.89. Температура внутри огненного шара, как это указывалось ранее, непрерывно падает, однако температура поверхности огненного шара («видимая температура»), которая определяет интенсивность светового излучения, вначале уменьшается до некоторого минимума, а затем увеличивается до максимума и только после этого начинает непрерывно уменьшаться. Основная причина этого своеобразного явления заключается в том, что воздух, нагретый до температуры свыше 2300° С, очень легко поглощает и испускает световое излучение; при меньших температурах световое излучение поглощается и испускается с незначительной интенсивностью.

II.90. По мере того как в начальной стадии взрыва ударная волна (фронт которой в этот момент совпадает с внешней поверхностью огненного шара) распространяется все дальше и дальше, ее энергия уменьшается. Температура на поверхности огненного шара, обусловленная нагревом воздуха ударной волной, быстро падает. Согласно хорошо проверенным законам интенсивность испускания огненным шаром светового излучения пропорциональна $R^2 \cdot T^4$, где R — радиус огненного шара в данный момент, а T — соответствующая (абсолютная) температура его поверхности (см. § VII.109). Хотя R и увеличивается во времени, но T падает настолько быстро, что величина R^2T^4 уменьшается. К моменту отрыва ударной волны эта величина становится так мала, что воздух, нагретый ударной волной, уже не светится, другими словами, интенсивность светового излучения фронта ударной волны будет незначительна.

II.91. Поскольку фронт ударной волны не может испускать световое излучение, он не может и поглощать его, вследствие чего воздух позади фронта ударной волны, который имеет более высокую температуру, становится видимым. Таким образом, температура поверхности огненного шара («видимая температура») после того, как она упала до минимума, соответствующего приблизительно 2100° С, начинает увеличиваться. По мере того как воздух перед фронтом излучения становится менее раскаленным, температура поверхности огненного шара («видимая температура») непрерывно возрастает благодаря постепенной демаскировке горячей изотермической сферы до тех пор, пока не будет достигнута температура

последней. Максимум этой температуры составляет примерно 8000° С. Это значение температура приобретает приблизительно через 0,15 секунды после взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* и через 1 секунду после взрыва боеприпаса с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*. После этого температура всего огненного шара, которая теперь снова примерно одинакова во всем его объеме, непрерывно падает в связи с охлаждением горячих газов в результате излучения и расширения огненного шара.

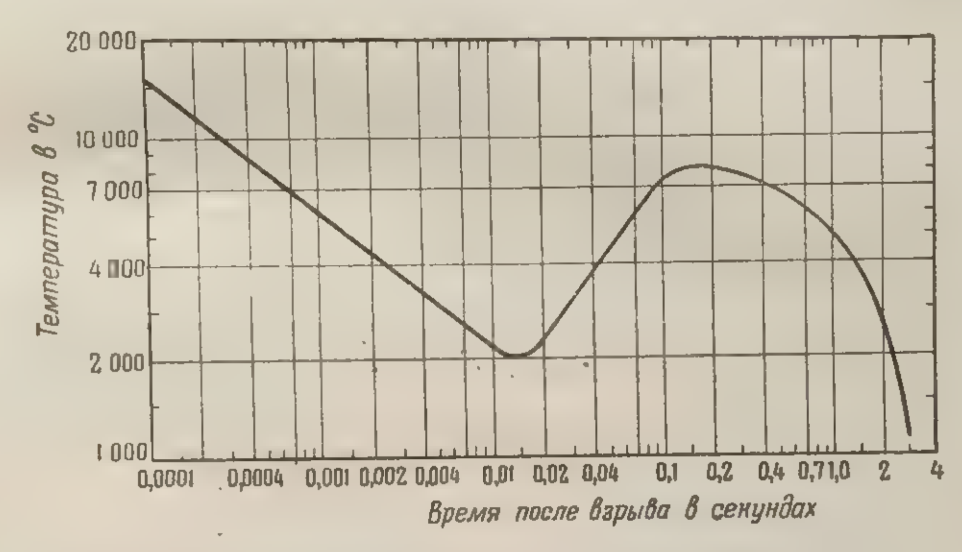


Рис. II.92. Изменение во времени температуры поверхности огненного шара („видимой температуры") при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*

II.92. На рис. II.92 показано изменение во времени температуры поверхности огненного шара («видимой температуры») в период от 10^{-4} секунды до 3 секунд после взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*. Благодаря быстрому росту огненного шара в течение первой сотой доли секунды (см. рис. II.85) температура его поверхности («видимая температура») резко падает примерно с 15 000° С до 2100° С (тепловой минимум). Этим значениям температуры на графике соответствуют моменты времени после взрыва 10^{-4} секунды (0,1 *мсек*) и 0,013 секунды (13 *мсек*). После этого наблюдается относительно медленное возрастание температуры до ее максимума, равного 8000° С, который наблюдается примерно через 0,15 секунды после взрыва, после чего температура в течение нескольких секунд непрерывно падает и в конечном счете приобретает значение температуры окружающей атмосферы. К этому времени огненный шар, конечно, уже не существует, его место занимает атомное облако.

II.93. Как было указано выше, графики на рис. II.85 и II.92 построены для случая взрыва ядерного заряда с тротиловым эквива-

лентом 20 тыс. *т*, однако подобные результаты получаются и при ядерных взрывах другой мощности.

Скорость роста огненного шара зависит от тротилового эквивалента, как зависит от него и его радиус (см. равенства II.87.1 и II.88.1). Время, по истечении которого происходит отрыв ударной волны, а также наступает последующий температурный максимум, увеличивается с возрастанием тротилового эквивалента (см. § VII. 112). Однако соответствующие значения температуры по существу не зависят от тротилового эквивалента взрыва.

Ядерные взрывы и метеорологические условия

II.94. Время от времени, особенно после серии экспериментальных взрывов в Тихом океане и в штате Невада, высказывались предположения относительно возможного влияния ядерных взрывов на погоду. Эти предположения основаны главным образом на двух соображениях. Во-первых, полагали, что энергия, добавленная в атмосферу в результате взрывов, может изменять обычно существующие метеорологические условия, во-вторых, считалось, что продукты взрыва могут служить в качестве своеобразного фактора, способного повлиять на характер преобразования значительных запасов энергии, аккумулированных в атмосфере.

II.95. Добавление энергии в атмосферу в результате ядерных взрывов, по-видимому, не является важным фактором, так как оно невелико по сравнению с количеством энергии, связанной с большинством метеорологических явлений. Кроме того, эта энергия освобождается таким способом, при котором маловероятно изменение метеорологических условий. При нестабильном состоянии атмосферы внезапный импульс ядерного взрыва может вызвать некоторое изменение погоды. Что касается образования гроз, то следует считать, что освобождение энергии при ядерном взрыве происходит слишком быстро для того, чтобы оно могло вызывать соответствующую перестройку в атмосферных условиях.

II.96. На первый взгляд кажутся приемлемыми следующие виды косвенного воздействия продуктов ядерного взрыва на метеорологические условия:

1) частицы различных веществ, поднятых в воздух взрывом, могут вызывать сгущение капелек воды в существующих облаках; частицы в этом случае оказывают действие, аналогичное действию затравочных кристаллов (центров конденсации), изменяя таким образом систему облачности и распределение осадков в больших районах;

2) в связи с радиоактивным характером остатков бомбы будет изменяться электрическая проводимость воздуха, и это может оказать некоторое влияние на наблюдаемые метеорологические явления;

3) частицы различных веществ, попадая в стратосферу, могут помешать передаче лучистой энергии от солнца и, таким образом, явиться причиной уменьшения этой энергии на земной поверхности. Ниже эти виды влияния ядерного взрыва на метеорологические условия будут рассмотрены дополнительно.

II.97. Хотя методы исследований явления сгущения мелких капель воды вокруг твердых частиц еще недостаточно совершенны и подлежат дальнейшему изучению, данные, полученные до сих пор, свидетельствуют о том, что частицы, оставшиеся от бомбы, не являются эффективными агентами при образовании облаков. Правда, после ядерного взрыва в августе 1945 г. в районе Хиросима выпал дождь, но, ~~по-видимому~~, это было в значительной мере обусловлено многочисленными пожарами, которые поддерживали конвекцию воздуха в течение нескольких часов после взрыва. Подобные явления наблюдались при соответствующих атмосферных условиях во время крупных лесных пожаров и над горящими городами («огненные штормы») во время второй мировой войны. Однако при многочисленных экспериментальных ядерных взрывах, не сопровождавшихся крупными пожарами, такие явления не наблюдались.

II.98. В течение двух или трех часов после взрыва при проведении испытаний «Эйбл» [воздушный взрыв у атолла Бикини в 1946 г.] в северной части Маршалловых островов прошли небольшие ливни. Была сделана попытка связать это явление с наличием атомного облака. Но дожди прошли в обширном районе, и их выпадение можно было легко объяснить, исходя из существовавших метеорологических условий. Имеющиеся данные по этому взрыву показывают, что все зафиксированные изменения в состоянии ветра и структуре атмосферы были кратковременны и обусловливались действием ударной волны и светового излучения. Во всяком случае, такие изменения имели значение только в непосредственной близости от места взрыва. Основная система облаков над лагуной не изменилась, если не считать появления атомного облака, непосредственно связанного со взрывом.

II.99. Степень ионизации, произведенной радиоактивными излучениями даже при очень мощном ядерном взрыве, по-видимому, будет недостаточной, чтобы оказать сколько-нибудь заметное влияние на общие атмосферные условия. Поэтому маловероятно, чтобы ионизация, сопровождающая ядерный взрыв, могла оказать влияние на погоду.

II.100. Известно, что пыль, поднимающаяся при сильных вулканических извержениях (например, таких, как извержение вулкана Кракатао, происшедшее в 1883 г.), вызывает заметное уменьшение количества солнечного света, достигающего земной поверхности. Однако то, что уменьшение поступающей от солнца энергии оказывает большое влияние на погоду, никем установлено не было. Ко-

личество частиц различных веществ, остающихся в атмосфере после взрывов даже самых мощных ядерных бомб, вероятно, не превышает 1% (или около этого) частиц, поднятых при извержении Кракатао. Кроме того, данные о солнечном излучении показывают, что пока ни один из ядерных взрывов не привел к сколько-нибудь заметным изменениям в количестве прямого солнечного света, достигающего земной поверхности.

II.101. Ввиду изменчивости метеорологических явлений, обусловленных природными причинами, трудно доказать (или опровергнуть), что то или иное изменение погоды после ядерного взрыва было вызвано этим взрывом. Однако компетентные метеорологи как в США, так и в некоторых других странах придерживаются единого мнения, согласно которому ядерные взрывы не оказывали влияния на погоду, если не считать локализованного действия поблизости от района испытания.

ГЛАВА III

ЯДЕРНЫЙ ВЗРЫВ В ВОЗДУХЕ И ЕГО ДЕЙСТВИЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Возникновение ударной волны

III.1. Бóльшая часть разрушений при воздушном взрыве ядерной бомбы в основном вызывается (прямо или косвенно) действием образующейся при взрыве ударной волны. При этом сооружения чаще всего получают повреждения, если избыточное давление ударной волны составляет величину не менее 0,035 *кг/см²*. Расстояние от центра взрыва, на котором ударная волна имеет такое давление, зависит от мощности и высоты взрыва. Отсюда вытекает важность подробного рассмотрения всех явлений, связанных с распространением ударной волны в воздухе.

III.2. Разница в давлении, испытываемом различными поверхностями сооружения, создает нагрузку на сооружение в целом. При рассмотрении разрушающего действия ударной волны избыточное давление выступает как важнейшая ее характеристика; поэтому в последующих разделах будет рассмотрено, как изменяется величина избыточного давления в зависимости от времени и расстояния. Наибольшее значение избыточного давления, т. е. величина избыточного давления во фронте ударной волны, называется **максимальным избыточным давлением.** Кроме максимального избыточного давления, будут рассмотрены также и такие характеристики, как **скоростной напор, время действия и время распространения ударной волны.**

III.3. Как уже показано в главе II, расширение газов, заключенных в огненном шаре и имеющих исключительно высокую температуру и давление, приводит к образованию воздушной ударной волны, распространяющейся от центра взрыва во все стороны с большой скоростью. Характерной особенностью этой волны является то, что максимальное давление сосредоточено в ее фронте; затем давление убывает по направлению к центру взрыва. На рис. III.3 показана картина изменения давления за фронтом ударной волны на самой ранней стадии ее образования в зависи-

мости от расстояния до центра огненного шара. Из рисунка видно, что до момента отрыва ударной волны (см. § II.84) давление в ее фронте приблизительно вдвое превышает очень высокое давление внутри огненного шара.

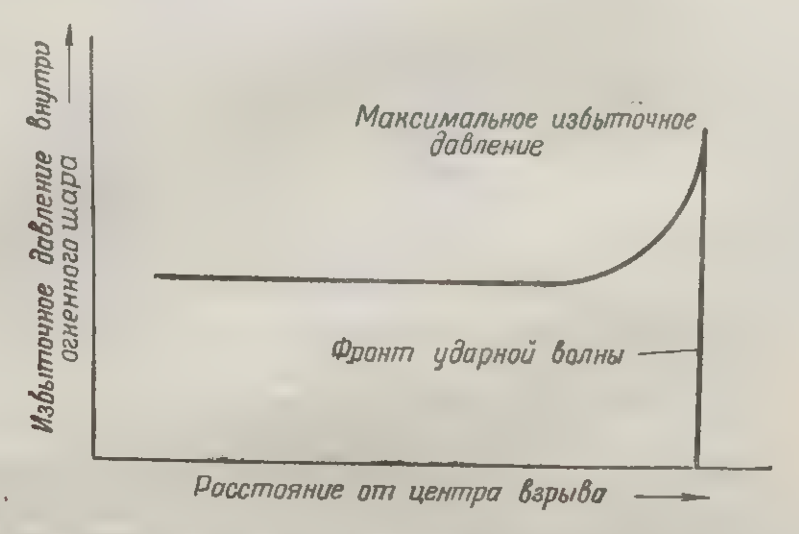


Рис. III.3. Изменение избыточного давления в огненном шаре в зависимости от расстояния от центра взрыва

III.4. По мере удаления воздушной ударной волны от источника ее образования избыточное давление во фронте и за фронтом постепенно уменьшается. Начиная с некоторого расстояния, давление за фронтом волны становится ниже давления окружающей атмосферы; с этого момента появляется так называемая **фаза разрежения.** На рис. III.4 показан характер изменения избыточного давления в зависимости от расстояния для шести последовательных моментов времени, отмеченных индексами 1, 2, 3, 4, 5 и 6. На кривых от t_1 до t_5 давление в ударной волне не становится ниже атмосферного; на кривой t_6 избыточное давление позади фронта на некотором расстоянии от него имеет отрицательную величину. В этой зоне давление воздуха ниже атмосферного.

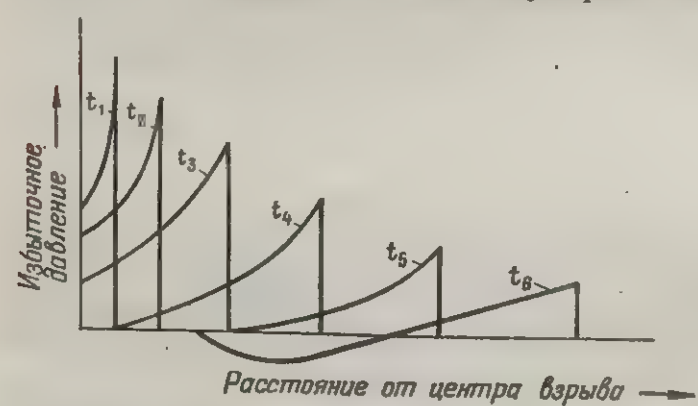


Рис. III.4. Изменение избыточного давления в ударной волне в зависимости от расстояния для различных моментов времени

III.5. В фазе отрицательного избыточного давления (фазе разрежения) создается разреженное простран-

ство, в которое засасывается окружающий воздух (вместо выталкивания, как это обычно бывает при положительной величине избыточного давления в фазе сжатия).

В фазе сжатия масса воздуха, вовлеченная в движение ударной волной, направлена в сторону от центра взрыва, а в фазе разрежения — к центру взрыва. К концу фазы разрежения давление в ударной волне поднимается до давления окружающей атмосферы. Максимальная величина избыточного отрицательного давления является небольшой по сравнению с максимальной величиной положительного избыточного давления.

Изменение избыточного давления во фронте воздушной ударной волны с течением времени

III.6. С практической точки зрения интересно проследить за характером изменения величины избыточного давления во фронте ударной волны в зависимости от времени в какой-либо фиксированной точке. На рис. III.6 приведен график изменения избыточного давления во времени в фиксированной точке (ударная волна достигнет этой точки через несколько секунд или даже через полминуты после взрыва). На левой стороне рис. III.6 показана общая картина воздействия избыточного давления на легкие постройки, деревья и мелких животных в различные моменты времени прохождения ударной волны.

III.7. Давление воздуха в фиксированной точке повышается не сразу после взрыва, а спустя некоторое время, необходимое для прохождения ударной волной расстояния от центра взрыва до этой точки. В момент прихода фронта ударной волны давление воздуха в рассматриваемой точке скачкообразно повышается до величины максимального избыточного давления. На рис. III.6 цифрой *1* обозначен момент взрыва, а цифрой *2* — момент прихода фронта ударной волны в фиксированную точку. С приходом ударной волны в эту точку одновременно с повышением давления возникает движение самой среды. Образовавшиеся за фронтом ударной волны потоки воздуха весьма скоротечны; они быстро теряют свою скорость во времени.

III.8. Максимальное давление, соответствующее моменту прихода фронта ударной волны, тут же начинает быстро уменьшаться и в момент времени, соответствующий точке *3* на рис. III.6, становится равным первоначальному атмосферному давлению.

Несмотря на то, что в этой точке избыточное давление равно нулю, воздушная среда продолжает пока еще двигаться (в течение короткого времени) в том же направлении (от центра взрыва). Отрезок, заключенный между цифрами *2* и *3* на рис. III.6, соответствует времени действия положительного давления (фазе сжатия) ударной волны. Для взрыва мощностью в 20 тыс. *т* этот промежуток

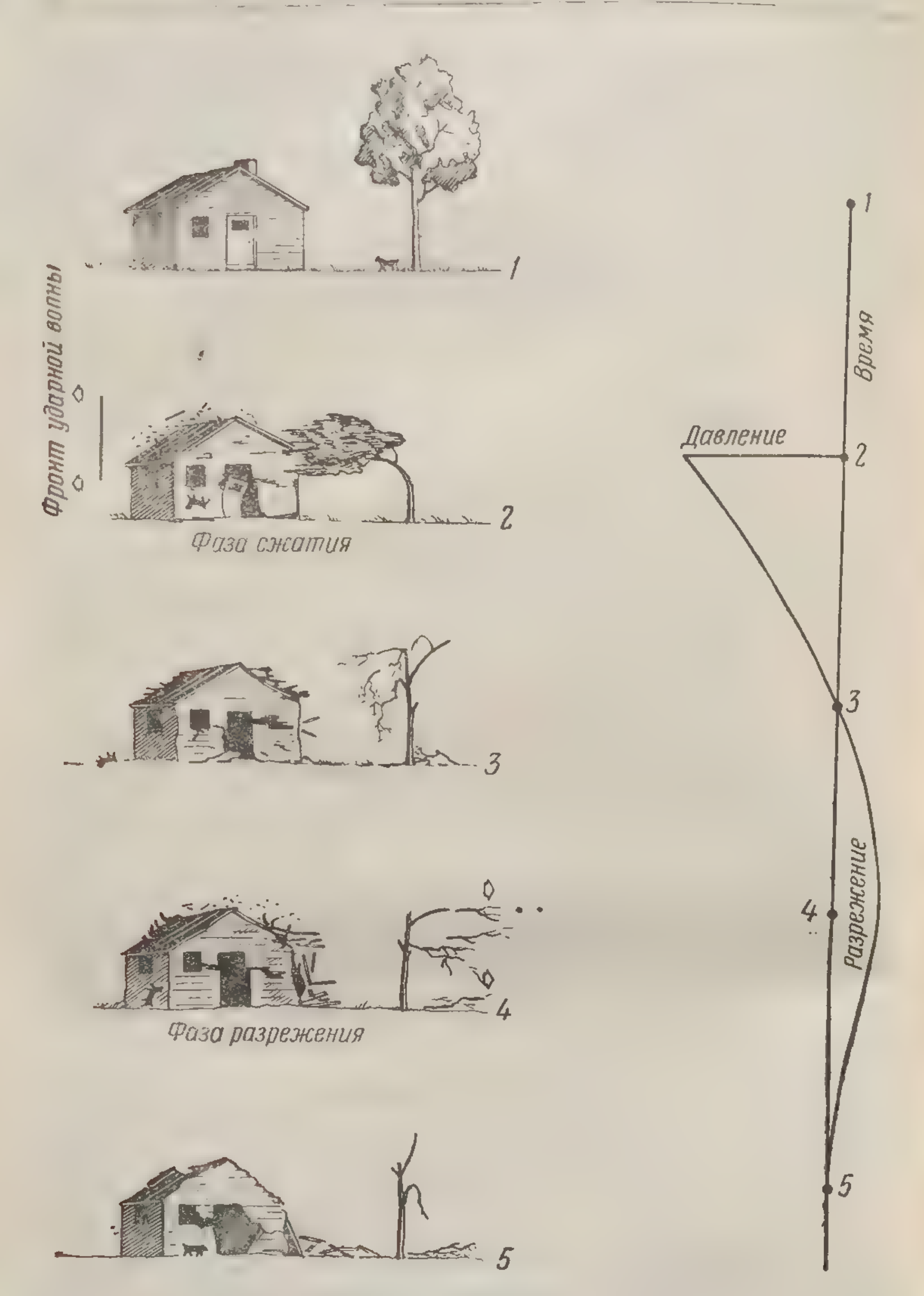


Рис. III.6. Изменение давления в фиксированной на местности точке в зависимости от времени и действие ударной волны на местные предметы

времени составляет приблизительно от 0,5 до 1,0 секунды, а для взрыва в 1 млн. *т* — от 2 до 4 секунд. Именно в этот период воздушная ударная волна обладает наибольшим разрушающим действием.

III.9. Процесс уменьшения давления ударной волны не прекращается и после достижения величины атмосферного давления. С этого момента в рассматриваемой точке пространства начинается новая фаза — фаза отрицательного давления (фаза разрежения) ударной волны, которая длится несколько секунд. На рис. III.6 продолжительность фазы разрежения соответствует отрезку *3—5*. В течение большей части этой фазы воздушные потоки имеют обратное направление (к центру взрыва). В фазе разрежения ударная волна может произвести некоторые разрушения, однако они, как правило, будут небольшими, так как максимальное отрицательное избыточное давление всегда меньше максимального избыточного давления фазы сжатия (давление во фронте ударной волны). В фазе разрежения давление сначала уменьшается, а затем увеличивается, достигая к моменту времени, обозначенному цифрой *5*, величины давления окружающей атмосферы. К этому моменту практически прекращается также и движение масс воздуха, вследствие чего прекращается и непосредственное разрушающее действие взрыва. Однако может иметь место косвенное разрушающее действие от возникающих пожаров (см. главу VII).

Скоростной напор (динамическое давление)

III.10. Несмотря на то, что разрушающее действие ударной волны обычно характеризуется величиной избыточного давления в ее фронте, необходимо иметь в виду другой важный параметр, а именно: скоростной напор. Для значительной части сооружений степень разрушения зависит главным образом от величины силы (нагрузки) торможения, возникающей в результате движения масс воздуха за фронтом ударной волны. На величину этой силы оказывают влияние некоторые характеристики сооружения (главным образом его форма и размеры), но в основном она зависит от максимального скоростного напора и продолжительности его действия на сооружение.

III.11. Скоростной напор является функцией скорости и плотности воздуха за фронтом ударной волны. В свою очередь оба указанных параметра зависят от избыточного давления ударной волны и связаны с величиной этого давления (при идеальных условиях во фронте ударной волны) равенствами, которые приводятся ниже (см. § III.80). Для сильных ударных волн скоростной напор превосходит избыточное давление, но при избыточном давлении, меньшем 4,9 $кг/см^2$, он становится ниже избыточного давле-

ния. Так же как максимальное избыточное давление ударной волны, максимальный скоростной напор уменьшается с увеличением расстояния от центра взрыва, хотя это уменьшение происходит в неодинаковой степени. Некоторые данные, характеризующие соотношение величин максимального избыточного давления, максимального скоростного напора и максимальной скорости движения воздуха во фронте ударной волны, приведены в табл. III.11. Из таблицы видно, что скоростной напор уменьшается с расстоянием значительно быстрее, чем избыточное давление ударной волны.

Таблица III.11

Избыточное давление, скоростной напор и скорость движения массы воздуха

Максимальное избыточное давление, $кг/см^2$	Максимальный скоростной напор, $кг/см^2$	Максимальная скорость движения воздуха, *м/сек*
5,1	5,6	520
3,5	2,8	420
2,1	1,1	300
1,4	0,56	210
0,70	0,14	130
0,35	0,05	72
0,14	0,007	30

III.12. В фиксированной точке скоростной напор уменьшается во времени так же, как и избыточное давление, но скорости изменения этих величин за фронтом ударной волны различны. Это можно видеть из рис. III.12, на котором представлены качественные кривые изменения избыточного давления и скоростного напора в определенной фиксированной точке, в которую фронт ударной волны приходит примерно в течение первой секунды после взрыва. Когда фронт ударной волны достигает данной точки, величины указанных параметров резко возрастают до максимума, а затем начинают уменьшаться. Из рис. III.12 видно, что избыточное давление и скоростной напор становятся равными нулю в один и тот же момент времени. В действительности же скорость потока воздуха (и, следовательно, скоростной напор) упадет до нуля несколько позднее, чем избыточное давление, главным образом из-за инерции движущегося воздуха, но это различие не имеет значения для оценки разрушающего действия ударной волны.

III.13. Во второй фазе ударной волны — фазе разрежения — скоростной напор очень мал и действует в обратном направлении. Поэтому повреждения, вызванные скоростным напором (или силой торможения) в фазе разрежения, также очень малы.

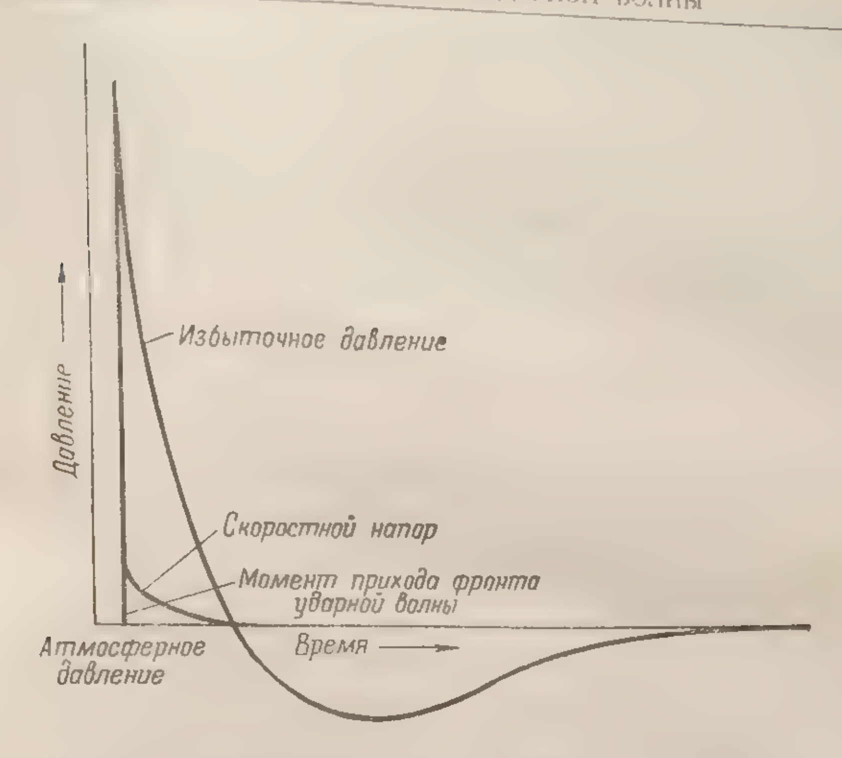


Рис. III.12. Изменение избыточного давления и скоростного напора в фиксированной точке в зависимости от времени

Время распространения и время действия ударной волны

III.14. Как указывалось выше, для прохождения ударной волной расстояния от центра взрыва до какой-либо точки требуется определенное время. Это время (время распространения) зависит от мощности взрыва и расстояния. Например, при мощности взрыва, равной 1 млн. *т*, время распространения ударной волны на расстояние 1,6 *км* составляет около 4 секунд. Вначале скорость фронта ударной волны очень высока, во много раз больше скорости звука, но по мере распространения ударной волны ее скорость уменьшается, так как давление во фронте падает. Наконец, на большом удалении ударная волна превращается по существу в звуковую волну и ее скорость приближается к скорости звука в окружающей среде.

III.15. Время действия ударной волны в какой-либо точке пространства также зависит от мощности взрыва и расстояния. На малых расстояниях от центра взрыва продолжительность фазы сжатия весьма незначительна; по мере распространения ударной волны она увеличивается. Например, при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т* время действия фазы сжатия на расстоянии 1,6 *км* составляет около 2 секунд.

III.16. В § III.12 отмечалось, что скорость движения потока воздуха за фронтом ударной волны падает до нуля и затем меняет

направление в некоторый момент времени после окончания фазы сжатия. Следовательно, продолжительность действия скоростного напора может превосходить продолжительность действия избыточного давления в фазе сжатия на различную величину в зависимости от величины избыточного давления. Однако скоростной напор по окончании фазы сжатия настолько мал, что практически он не имеет никакого значения. Поэтому время, в течение которого скоростной напор является эффективным, можно принимать в основном равным продолжительности фазы сжатия, как это показано на рис. III.12.

ОТРАЖЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ПОВЕРХНОСТИ

Падающая и отраженная волна

III.17. Когда падающая ударная волна, возникающая при воздушном взрыве, достигает более плотной среды, например поверхности земли или воды, она отражается. Процесс образования отраженной ударной волны в этих условиях показан на рис. III.17. На этом рисунке показаны четыре стадии распространения сферической ударной волны от центра воздушного взрыва. В первой стадии фронт ударной волны не достиг поверхности земли. Во второй стадии фронт ударной волны распространился несколько дальше, но еще не достиг поверхности земли. В третьей, более поздней стадии образовалась отраженная ударная волна, которая показана на рисунке пунктиром.

III.18. Когда происходит такое отражение, человек или предмет, находящийся непосредственно на поверхности, испытывает один удар, так как отраженная волна образуется мгновенно. Следовательно, за величину избыточного давления на поверхности земли практически можно принять только величину давления отражения.

Рис. III.17. Отражение ударной волны от поверхности земли при воздушном взрыве; t_1—t_4 — последовательные моменты времени

В районе эпицентра взрыва величина избыточного давления отраженной волны будет более чем в два раза превышать величину максимального избыточного давления падающей ударной волны. Величина избыточного давления отражения (см. § III.80 и III.81) зависит от энергии падающей волны и от угла ее падения. На рис. III.18 показан ха-

рактер изменения избыточного давления воздуха во времени для точки А (см. рис. III.17), находящейся на поверхности земли близ эпицентра взрыва. Можно считать, что точка *A* лежит в ближней зоне распространения ударной волны (области регулярного отражения), т. е. в области, где не происходит слияния фронтов падающей и отраженной ударных волн.

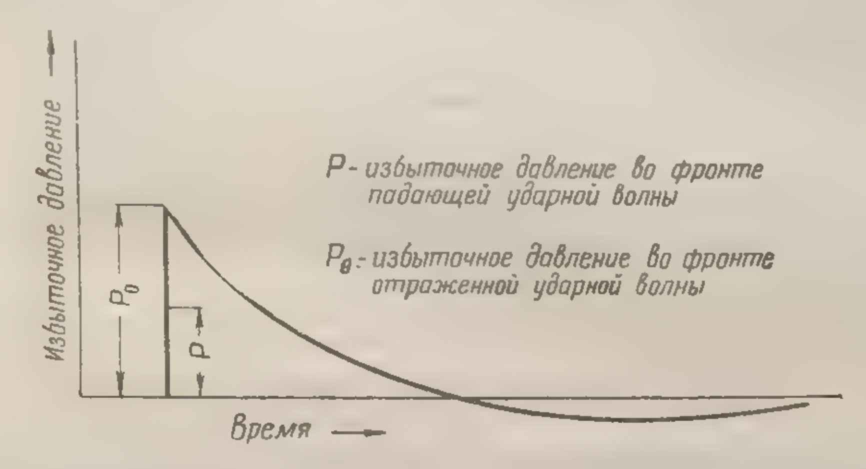


Рис. III.18. Изменение избыточного давления во времени в фиксированной точке на поверхности земли в ближней зоне распространения ударной волны

III.19. Любая точка этой области, находящаяся на некоторой небольшой высоте от поверхности земли, будет испытывать два последовательных удара: первый — в результате действия падающей ударной волны и второй — в результате действия отраженной волны, которая приходит в данную точку с небольшим запозданием (см. рис. III.19). Такой точкой может быть, например, точка *B* (см. рис. III.17). Когда фронт падающей ударной волны достигает

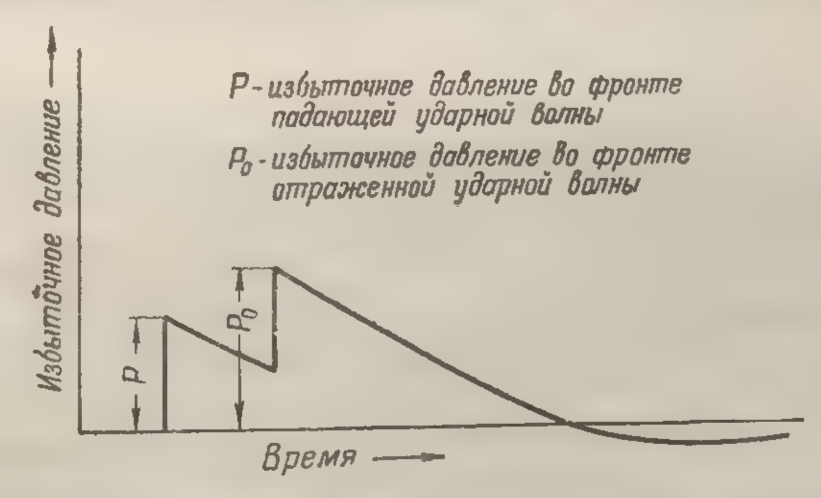


Рис. III.19. Изменение избыточного давления во времени в фиксированной точке над поверхностью земли в ближней зоне распространения ударной волны

этой точки, фронт отраженной волны будет находиться еще на некотором расстоянии от нее. Следовательно, пройдет некоторое небольшое время до того, как отраженная волна достигнет точки, находящейся над поверхностью. С другой стороны, в рассматриваемой точке величина максимального избыточного давления отраженной волны будет меньше величины, которую эта волна имела непосредственно на поверхности, так как величина давления уменьшается по мере распространения волны. При оценке действия ударной волны воздушного взрыва на сооружения, расположенные в ближней зоне ее распространения, нужно учитывать интенсивность и направление движения падающей и отраженной волн. После прохождения отраженной волны скоростной напор вблизи поверхности земли имеет в основном горизонтальное направление.

Образование головной ударной волны

III.20. Вышеприведенное рассуждение относительно разницы во времени прихода фронтов падающей и отраженной ударных волн в некоторую точку, находящуюся над поверхностью земли, например в точку B (см. рис. III.17), основывается на предположении, что обе волны движутся приблизительно с одинаковой скоростью. Это предположение вполне справедливо для ранних стадий распространения ударной волны, когда ее фронт находится недалеко от эпицентра. Однако, как будет показано ниже, отраженная волна всегда движется через воздух, нагретый и сжатый в результате прохождения падающей волны. В результате этого отраженная ударная волна движется быстрее, чем падающая волна, и при определенных условиях догоняет ее, что приводит к слиянию фронтов двух ударных волн и образованию фронта третьей ударной волны. Это взаимодействие падающей и отраженной ударных волн называется явлением **нерегулярного** отражения. Область, в которой происходит слияние двух волн, называется областью нерегулярного отражения (**дальняя зона** распространения ударной волны) в отличие от области **регулярного** отражения (**ближняя зона** распространения ударной волны), где волны не сливаются.

III.21. Слияние фронтов падающей и отраженной ударных волн схематически показано на рис. III.21, на котором изображена часть профиля ударной волны вблизи поверхности земли. На рис. III.21, *а* показано положение падающей и отраженной волн в точке, находящейся достаточно близко от эпицентра, например в точке A (см. рис. III.17). На бо́льшем расстоянии от эпицентра (рис. III.21, *б*) более крутой фронт отраженной волны свидетельствует о том, что она движется быстрее и нагоняет падающую волну. В дальнейшем отраженная волна сливается у поверхности земли, как показано на рис. III.21, *в*, с падающей волной, образуя третью ударную волну,

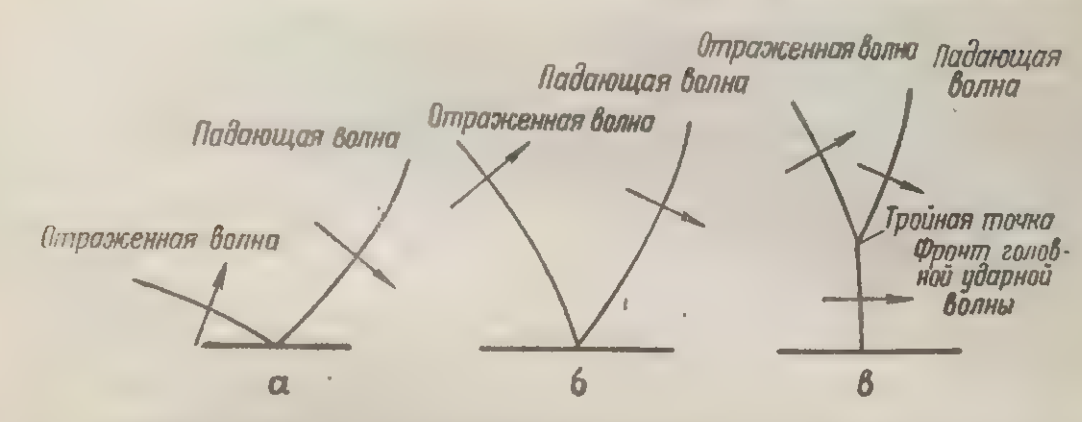


Рис. III.21. Слияние падающей и отраженной ударных волн и образование головной ударной волны

называемую **головной волной.** Точка, в которой встречаются фронт падающей волны, фронт отраженной волны и фронт головной волны, называется **тройной точкой**[1].

III.22. По мере того как отраженная волна продолжает нагонять падающую волну, тройная точка постепенно поднимается над поверхностью земли, и высота головной волны увеличивается (рис. III.22). Любой предмет, находящийся непосредственно на поверхности земли или на некоторой высоте от нее, не превышающей высоту головной волны (т. е. ниже траектории тройной точки), испытывает только одно воздействие от двух слившихся волн.

Характер действия образовавшейся головной ударной волны в общем аналогичен характеру действия обычной ударной волны. Избыточное давление во фронте головной ударной волны в фиксированной точке убывает во времени; за фазой сжатия следует фаза разрежения, как это показано на рис. III.6.

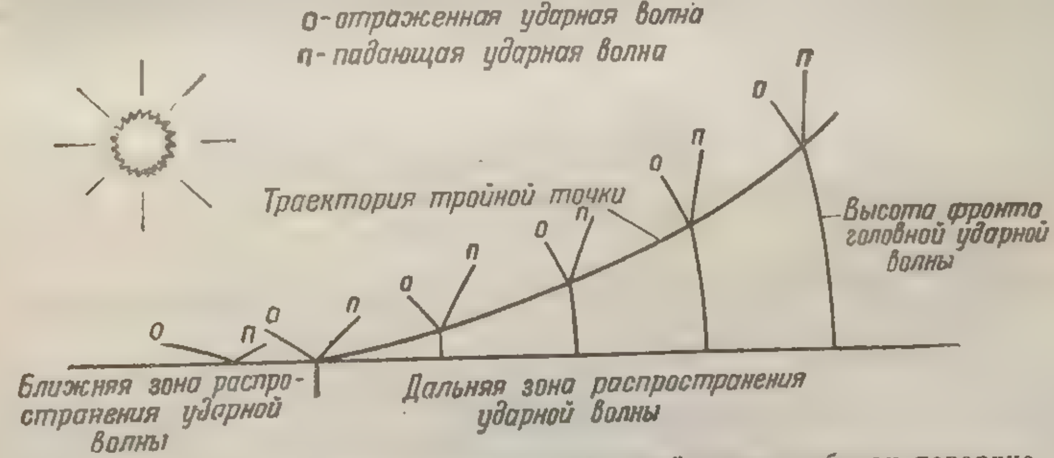


Рис. III.22. Характер распространения ударной волны вблизи поверхности земли в дальней зоне

[1] Так называемая тройная точка в действительности является не одной точкой, а системой точек, образующих окружность.

III.23. Объекты, находящиеся на значительных высотах, превышающих траекторию тройной точки, например самолет или верхняя часть высокого здания, будут подвержены воздействию двух следующих друг за другом ударов. Вначале окажет воздействие падающая ударная волна, а затем через короткий промежуток времени подействует отраженная волна. При контактном наземном (надводном) ядерном взрыве образуется только одна слившаяся волна, скользящая вдоль поверхности земли (воды). Следовательно, объекты, находящиеся на поверхности земли и над нею, будут подвержены воздействию только одного удара волны.

III.24. При рассмотрении разрушающего действия ударной волны при воздушном взрыве следует обращать внимание по меньшей мере на два момента. Во-первых, в дальней зоне распространения ударной волны на высоте, лежащей ниже тройной точки, действует только одна волна, в то время как в ближней зоне действуют независимо друг от друга две волны — падающая и отраженная. Во-вторых, поскольку фронт образовавшейся головной волны почти вертикален, то поток воздуха в распространяющейся волне направлен в основном параллельно поверхности земли (см. рис. III.21). Поэтому в дальней зоне силы, возникающие при воздействии ударной волны на сооружения и различные объекты, направлены почти горизонтально, вследствие чего их вертикальные поверхности испытывают значительно бóльшую нагрузку, чем горизонтальные.

III.25. Расстояние от эпицентра, на котором начинается слияние падающей и отраженной волн с образованием головной волны, зависит от мощности и высоты взрыва. Так, например, при мощности взрыва в 1 млн. *т* и при высоте, обычно назначаемой для такого взрыва, головная волна начинает образовываться на расстоянии около 2 *км* от эпицентра. С уменьшением высоты взрыва расстояние до начала области нерегулярного отражения сокращается. И, наоборот, с увеличением высоты взрыва указанное расстояние увеличивается. При достаточно большой высоте взрыва будет происходить только регулярное отражение и не будет образовываться головная волна.

Высота взрыва и разрушения, вызываемые ударной волной

III.26. Высота и мощность ядерного взрыва являются важными факторами, от которых зависит степень разрушения объектов, находящихся на поверхности земли. Эти две величины обычно обусловливают характер изменения давления в волне при изменении расстояния от эпицентра взрыва, а также другие характеристики, в том числе расстояние от эпицентра до начала области нерегулярного отражения (дальней зоны). С уменьшением высоты взрыва (при неизменной мощности) происходит следующее:

1. Головная волна начинает образовываться на более близком расстоянии от эпицентра.

2. Избыточное давление на поверхности земли в районе эпицентра становится больше. При контактном наземном взрыве избыточное давление в непосредственной близости от центра взрыва достигает максимального значения. Кроме того, как будет указано в главе V, при этом наблюдается образование воронки и возникновение волны сжатия в грунте. Более подробно различие в характеристиках ударной волны при контактном наземном взрыве и типичном воздушном взрыве будет охарактеризовано ниже.

III.27. Из существующей зависимости между мощностью и высотой взрыва следует, что для получения соответствующего эффекта от взрыва заряда с бо́льшим тротиловым эквивалентом требуется бо́льшая высота взрыва; при этом можно получить ударную волну, сходную по своим характеристикам с ударной волной, образованной при низком воздушном взрыве. С другой стороны, взрыв небольшой мощности, произведенный невысоко над поверхностью земли, имеет характеристики типичного воздушного взрыва.

III.28. Атомные бомбы, сброшенные на японские города Хиросима и Нагасаки во время второй мировой войны, были взорваны на высоте около 620 *м*. Согласно существовавшему мнению, которое впоследствии подтвердилось испытанием атомного оружия, взрыв бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* именно на такой высоте вызовет максимальные разрушения наземных объектов, находящихся в районе избранной цели. В действительности с точки зрения действия ударной волны для какой-либо определенной мощности взрыва не может существовать только одна оптимальная высота; высота взрыва обусловливается прежде всего характером цели. Как правило, для разрушения прочных объектов требуется производить взрыв в воздухе на небольшой высоте или поверхностный взрыв. При нанесении удара по более слабым целям, которые разрушаются при сравнительно небольших величинах избыточного давления или скоростного напора, высоту взрыва следует увеличить, чтобы обеспечить поражение на большей площади, так как при этом образование головной ударной волны приводит к расширению области низких давлений.

Контактный взрыв

III.29. Ударная волна, образующаяся при наземном (надводном) взрыве, несколько отличается от ударной волны воздушного взрыва. При взрыве на поверхности фронт ударной волны в воздухе имеет полусферическую форму, как показано на рис. III.29; при этом взрыве отсутствует зона регулярного отражения ударной волны, и все объекты, расположенные даже вблизи центра, испытывают воздействие ударной волны, аналогичное воздействию

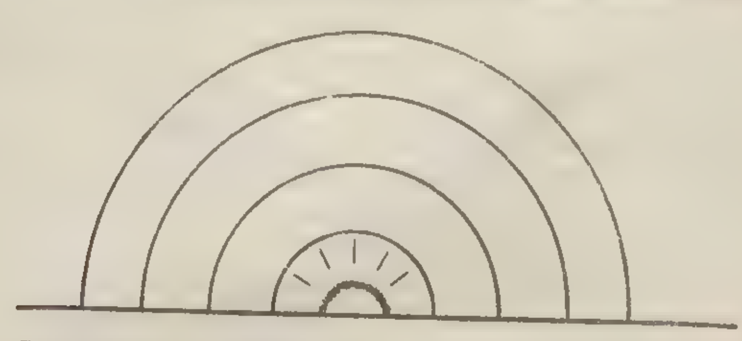


Рис. III.29. Образование ударной волны при наземном (надводном) взрыве; падающая и отраженная волны составляют единую волну

при воздушном взрыве, которому подвергаются объекты, расположенные в зоне нерегулярного отражения (ниже траектории тройной точки). Поэтому при рассмотрении действия ударной волны контактного взрыва на наземные сооружения можно считать, что ее фронт является вертикальным; избыточное давление и скоростной напор за фронтом ударной волны уменьшаются с различной скоростью. Как указывалось выше, массы воздуха, двигающиеся вслед за фронтом ударной волны вблизи поверхности, в основном направлены горизонтально.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЗРЫВА НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Влияние рельефа местности

III.30. При распространении ударной волны на местности с холмистым рельефом может наблюдаться как усиление, так и ослабление ее действия, т. е. увеличение или уменьшение максимального избыточного давления во фронте. Увеличение или уменьшение величин максимального избыточного давления на поверхности, по-видимому, зависит от угла наклона того или иного участка поверхности по отношению к горизонту. При набегании ударной волны на передние крутые склоны холмов может наблюдаться кратковременное увеличение максимального избыточного давления в результате отражения волны. На обратном достаточно крутом склоне холма можно ожидать некоторое снижение избыточного давления в волне. В общем, отклонение величины максимального избыточного давления в любой точке холма от величины максимального избыточного давления на горизонтальной плоскости зависит от формы и размеров холма, а также от его положения по отношению к месту взрыва. Поскольку промежуток времени, в течение которого происходит увеличение или уменьшение давления при набегании волны на холм, невелик по сравнению с длительностью фазы сжатия, то нужно ожидать, что влияние рельефа местности на

воздействие ударной волны на многие типы сооружений не является сколько-нибудь значительным.

III.31. Особенно важно подчеркнуть, что если объект находится за крутым склоном большого холма, закрывающего центр взрыва, то это еще не гарантирует защиту от действия ударной волны. Другими словами, тот факт, что центр взрыва не виден из-за холма, совершенно не означает, что действие ударной волны за холмом не будет ощущаться. Как будет показано ниже, ударные волны могут легко огибать (или дифрагировать) встречающиеся на пути препятствия.

III.32. Различные неровности местности могут защищать объект от действия светового излучения и, вероятно, в некоторой степени и от действия радиоактивного излучения взрыва. Однако не следует ожидать значительного ослабления действия ударной волны на сооружения за исключением особых случаев. В то же время, если укрыть подвижную технику в открытых выработках и глубоких траншеях заподлицо с поверхностью земли или за крутыми земляными насыпями, то можно в значительной степени защитить ее от летящих предметов и действия скоростного напора. Этот вопрос будет рассмотрен более подробно в главе XII.

III.33. Влияние городских строений на распространение ударной волны во многом можно уподобить влиянию рельефа местности. Можно ожидать, что наличие большого числа зданий, находящихся вблизи друг от друга, вызовет местные изменения в ударной волне, особенно в величине скоростного напора. С одной стороны, объекты и сооружения, расположенные на пути движения ударной волны, способствуют ее ослаблению, с другой стороны, наличие зданий, многократно отражающих ударную волну, и улиц, представляющих собой каналы для ее распространения, ведет к увеличению избыточного давления и скоростного напора. Поэтому в целом влияние городской застройки на разрушающее действие ударной волны будет сравнительно небольшим.

Влияние метеорологических условий

III.34. Наличие большого количества влаги в атмосфере может оказать влияние на свойства ударной волны в области низкого избыточного давления. Однако вероятность встречи волны с большой концентрацией влаги в атмосфере следует считать небольшой.

III.35. При соответствующих метеорологических условиях легкие повреждения построек можно наблюдать на значительно бо̀льших расстояниях, чем при обычных условиях. Это явление имеет место как при взрыве большого количества тротила, так и при ядерных взрывах. Оно является следствием одного из двух раз-

личных видов отклонения (пригибания) к земной поверхности ударной волны верхними слоями атмосферы. Первый вид отклонения возникает в результате появления градиентов температуры и скорости ветра в нижнем слое атмосферы толщиной около 9,0 *км*. Второй вид отклонения связан с наличием тех же условий в атмосфере на бо́льших высотах: порядка 40 *км* и более.

III.36. Если скорость ветра возрастает по мере увеличения высоты приблизительно на 5 *км/час* через каждые 300 *м*, а температура воздуха при этом уменьшается (что обычно наблюдается в дневное время), то отклонение ударной волны к земной поверхности происходит в пределах незначительного слоя атмосферы (в пределах нескольких тысяч футов). Отмеченное явление может привести к повышению концентрации энергии ударной волны в каком-либо районе (фокусе) на поверхности земли вследствие одновременного прихода в этот район нескольких ударных волн. Величина энергии ударной волны в этом районе может значительно превзойти величину энергии, соответствующей обычным условиям распространения ударной волны. Районов концентрации энергии ударной волны может быть несколько. Первый район может находиться на расстоянии 13—16 *км* от эпицентра. В нем произойдет обратное отражение ударной волны с повышенной концентрацией энергии в атмосферу и затем последующее ее возвращение на поверхность земли в район, находящийся на бо́льшем удалении от эпицентра. Этот процесс может повториться несколько раз. Известны случаи, когда взрыв бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* вызывал выбивание оконных стекол на расстоянии от 120 до 160 *км*.

III.37. В других случаях при мощных взрывах подобное же повышение давления (а также усиление звука взрыва) наблюдалось зимой на расстоянии 110—130 *км* и летом на расстоянии от 190 до 240 *км*. Это явление объясняется отражением ударных волн на высоте 40—65 *км* от сравнительно теплых слоев атмосферы (озоносферы) с фокусированием их на поверхности земли. Последующие процессы отражения от поверхности земли и от озоносферы происходили через определенные промежутки времени. В результате такого явления сильный взрыв можно услышать даже на более значительных расстояниях, чем те, которые приведены выше.

Влияние высоты

III.38. На зависимости между избыточным давлением, расстоянием и временем, которые характеризуют распространение ударной волны в воздухе, оказывают влияние условия окружающей атмосферы; последние же сами меняются в зависимости от

высоты. При рассмотрении влияния высоты на образование и распространение ударной волны следует остановиться на двух случаях: 1) центр взрыва и цель находятся на одной высоте; 2) центр взрыва и цель находятся на разных высотах.

III.39. При наземном (надводном) взрыве максимальное избыточное давление на данном расстоянии от центра взрыва зависит от атмосферного давления, которое изменяется с высотой над уровнем моря. Ниже (см. § III.89) даются простые поправочные коэффициенты, позволяющие учитывать различия в окружающих условиях, но пока можно сделать общие выводы.

С увеличением высоты как взрыва, так и цели избыточное давление на данном расстоянии от центра взрыва при неизменных величинах тротилового эквивалента в общем уменьшается. Соответственно этому можно ожидать увеличения времени распространения ударной волны и действия фазы сжатия. Для высот, не превосходящих 1500 *м* над уровнем моря, изменения указанных параметров ударной волны являются сравнительно небольшими. Поскольку наземные цели, как правило, находятся на более низких высотах над уровнем моря, то поправки на изменение условий внешней среды приходится делать редко.

III.40. При расположении центра взрыва и цели на различных высотах (как, например, при воздушном взрыве) характер распространения ударной волны становится более сложным. На него оказывают влияние температура и давление окружающей среды, поэтому зависимость избыточного давления от расстояния на поверхности земли будет непостоянной. В пределах зоны значительных разрушений для взрывов небольшой мощности отклонения, вызываемые атмосферными условиями, оказываются несущественными. Для взрывов большой мощности, при которых ударная волна распространяется на значительно большие расстояния, благодаря влиянию температурных инверсий и явлению отражения можно ожидать существенных местных отклонений от указанной выше зависимости избыточного давления от расстояния. Следовательно, в этом случае для получения более точных данных при расчетах параметров ударной волны необходимо иметь подробные сведения об атмосферных условиях в день взрыва. Для практических целей можно ограничиться введением упомянутых выше поправочных коэффициентов только в тех случаях, когда цель находится на некоторой существенной высоте над уровнем моря.

Влияние поверхности

III.41. В зависимости от характера поверхности, над которой на некоторой высоте производится взрыв определенной мощности, могут изменяться некоторые характеристики ударной волны.

Эти изменения зависят главным образом от характера и величины поверхности, над которой распространяется ударная волна. При взрыве в воздухе на малой высоте или непосредственно на поверхности имеет место потеря некоторого количества энергии вследствие образования волны сжатия в грунте. Этот вопрос будет рассмотрен в § III.43. Наличие на поверхности неровностей может оказать некоторое влияние при воздушном взрыве на зависимость избыточного давления от расстояния, а также на образование головной ударной волны. Однако этот фактор оказывает в общем небольшое влияние на разрушающее действие ударной волны. Результаты, приведенные ниже в настоящей главе, получены применительно к средним условиям на поверхности.

III.42. Характер поверхности оказывает известное влияние на степень повреждений, образующихся в результате ударов летящих предметов, увлекаемых ударной волной. Разрушения и повреждения могут быть вызваны летящими обломками скал, камнями, галькой, а также более мелкими частицами, например песком и пылью. Эти предметы, увлекаемые ударной волной, не обязательно оказывают влияние на величину избыточного давления. В районах с большим количеством пыли последняя может оказать некоторое влияние на величину скоростного напора и, следовательно, на характер его воздействия на объект, но, по-видимому, это влияние будет небольшим.

Волна сжатия в грунте при воздушном взрыве

III.43. Одной из проблем, которая может возникнуть при изучении действия ударной волны, является вопрос о возможном влиянии воздушного взрыва на подземные сооружения. Если взрыв происходит на умеренной высоте, то некоторая часть энергии взрыва переходит в грунт. В результате этого начинается небольшое колебание поверхности и в грунте появляется слабая волна сжатия. Давление ударной волны, действующее на поверхность грунта, передается им к подземным сооружениям без заметного ослабления. При этом основная составляющая усилия, передаваемого грунтом, будет направлена почти вертикально и равна приблизительно величине избыточного давления ударной волны. Явления, связанные с образованием волны сжатия в грунте, будут рассмотрены более подробно в гл. V и VI.

III.44. При высоких воздушных взрывах, когда величина избыточного давления в эпицентре взрыва относительно мала, в грунте возникает весьма слабая волна сжатия. В этом случае подземные сооружения средней прочности, расположенные даже в эпицентре взрыва, не будут испытывать серьезного воздействия. Исключение могут составить канализационные и другие линии, проложенные на малой глубине; они могут быть повреждены вблизи от эпицентра

из-за смещения грунта. Однако эти повреждения, как правило, не будут включать в себя разрыв металлических труб. При наземном взрыве, сопровождающемся образованием воронки, воздействие взрыва на подземные сооружения будет совершенно иным (см. гл. VI).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С СООРУЖЕНИЯМИ

Нагрузка ударной волны

III.45. Поведение объекта или сооружения, подвергающегося действию ударной волны в результате атомного взрыва, можно рассматривать с двух сторон. Во-первых, необходимо учитывать «нагрузку», под которой подразумевается сила, образующаяся вследствие действия давления ударной волны. Во-вторых, необходимо учитывать «реакцию», или деформацию сооружения, возникающую под действием нагрузки. Как правило, по величине деформации можно судить о разрушающем действии ударной волны, поскольку наличие в конструкции значительных остаточных деформаций снижает ее пригодность. Разрушения подвижных объектов могут быть вызваны также метательным действием ударной волны; объект может удариться о землю или о какой-либо другой более или менее прочно закрепленный объект. Например, транспортные средства повреждаются главным образом при опрокидывании и ударах их о землю. Кроме того, объекты могут получить косвенные повреждения от летящих осколков стекла, кирпичей, обломков строений и других предметов, увлекаемых ударной волной. Повреждения такого рода, конечно, зависят от конкретных условий.

III.46. Прямое разрушение сооружений, вызываемое действием воздушной ударной волны, может иметь различный характер. Например, ударная волна может прогнуть элементы стального каркаса, провалить крышу, вдавить стены внутрь, выломать панели и выбить окна. Вообще разрушения происходят в результате определенной деформации конструкции. Возникновение деформаций при атомном взрыве будет рассмотрено ниже.

III.47. При воздушном взрыве падающая ударная волна в эпицентре направлена перпендикулярно к поверхности земли. В ближней зоне распространения ударной волны силы, действующие на сооружения, будут иметь значительную вертикальную составляющую (до прихода отраженной волны). Следовательно, вместо нагрузки, действующей в основном в горизонтальном направлении на объекты, расположенные в дальней зоне (см. § III.24), здесь вначале будет действовать сила, направленная вниз, которая будет вызывать, например, продавливание крыш; кроме того, в сооружении возникнет также и деформация, обусловливаемая горизонтальной составляющей нагрузки.

Нагрузка обтекания

III.48. Когда фронт ударной волны достигнет передней стенки (лобовой поверхности) сооружения, происходит ее отражение. В результате этого избыточное давление быстро возрастает, увеличиваясь по меньшей мере в два раза (обычно в несколько раз) по сравнению с избыточным давлением во фронте падающей ударной волны. Величина давления отражения определяется различными факторами, такими, как давление в падающей ударной волне и угол между направлением движения ударной волны и стенкой сооружения. По мере продвижения фронта ударной волны избыточное давление, действующее на переднюю стенку сооружения, быстро падает до значения давления в ударной волне до отражения[1]. В то же время ударная волна обтекает углы так, что все сооружение в конце концов охватывается ударной волной.

В момент завершения обтекания стенки и крыша сооружения будут испытывать приблизительно одинаковое давление.

III.49. Вышеописанное явление в упрощенной форме показано на рис. III.49[2]. На рисунке показан план сооружения, на которое воздействует воздушная ударная волна, двигающаяся в горизонтальном направлении. На рис. III.49, *а* показано приближение фронта ударной волны к сооружению; направление движения фронта перпендикулярно передней стенке сооружения. На рис. III.49, *б* волна достигла передней стенки, создавая высокое избыточное давление. На рис. III.49, *в* ударная волна прошла половину ширины

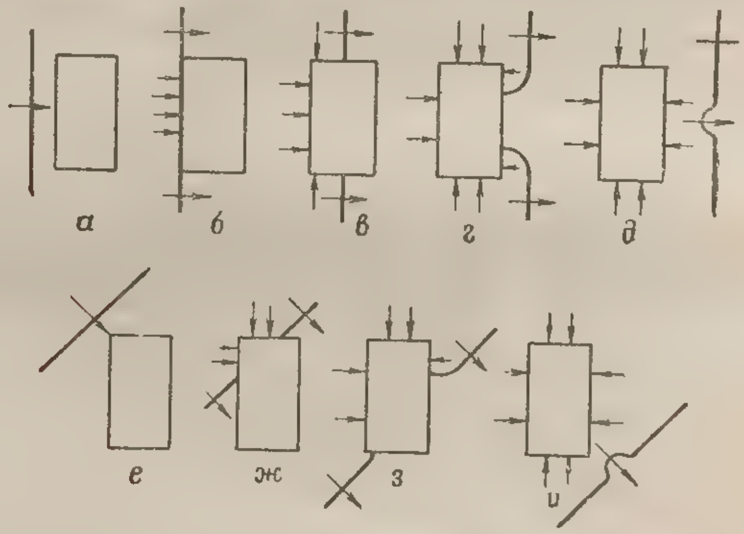


Рис. III.49. Обтекание сооружения ударной волной

---

[1] Это давление часто называется «боковым избыточным давлением», поскольку оно такое же, как давление, которое испытывает боковая стенка сооружения, где нет существенного отражения.

[2] Более подробно этот случай рассмотрен в главе VI.

сооружения и на рис. III.49, *г* достигла его задней стенки. По мере продвижения ударной волны давление на передней стенке понижается, а на боковых стенках увеличивается; как показано на рис. III.49, *д*, фронт ударной волны миновал сооружение, все его стенки и крыша сооружения испытывают приблизительно одинаковое давление. Если здание ориентировано под некоторым углом к направлению распространения ударной волны, то давление начнет оказывать действие сразу на две стороны (вместо одной), но общая картина будет такой же, как это показано на рис. III.49, *е*, *ж*, *з*, *и*.

III.50. В условиях, когда ударная волна полностью еще не охватила сооружение, будет наблюдаться значительная разница в давлениях на передней и задней стенках сооружения. Такая разница в давлениях создаст силу, которая будет стремиться сдвинуть сооружение в направлении действия ударной волны. Эта сила называется **нагрузкой обтекания**, так как она действует в то время, когда ударная волна обтекает здание. Величина и характер фактического смещения будут зависеть от размера, формы и веса сооружения, а также от того, насколько прочно оно связано с основанием. При определении реакции сооружения имеют значение, как это будет показано ниже, и другие характеристики сооружения.

III.51. Когда сооружение оказывается полностью охваченным ударной волной (рис. III.49, *г* или III.49, *и*), разница в давлении, испытываемом противоположными стенками сооружения, упадет почти до нуля, так как со всех сторон здания давление оказывается приблизительно одинаковым. Однако, поскольку это давление остается больше окружающего атмосферного давления (оно будет больше, пока не прекратится действие фазы сжатия ударной волны), на здание будет действовать нагрузка всестороннего сжатия. В сооружении, не имеющем проемов, действие этой нагрузки прекратится только тогда, когда избыточное давление упадет до нуля.

III.52. Степень разрушения сооружения при обтекании его ударной волной будет определяться величиной нагрузки и продолжительностью ее действия. Величина нагрузки зависит от максимального избыточного давления во фронте ударной волны, которое, следовательно, является важным фактором. Если рассматриваемое сооружение не имеет проемов, как это условно принималось выше, то продолжительность действия нагрузки обтекания грубо будет равна времени, которое требуется для прохождения ударной волны от передней до задней стенки сооружения. Таким образом, размеры сооружения будут влиять на длительность действия нагрузки обтекания. Для здания длиной 25 *м* нагрузка обтекания будет действовать приблизительно 0.1 секунды. Для объектов, подобных телеграфным столбам и дымовым трубам, время обтекания настолько мало, что действием нагрузки обтекания можно пренебречь.

III.53. Если в здании, подвергающемся действию ударной волны, имеется много отверстий или если окна, двери и панельные элементы этого здания очень легко разрушаются, то произойдет быстрое выравнивание давления внутри и снаружи сооружения. Это приведет к уменьшению разницы в давлении в процессе обтекания. В результате нагрузка обтекания, действующая на сооружение, уменьшится, хотя нагрузка на внутренние стены и перегородки будег больше, чем для здания, совершенно не имеющего проемов или имеющего малое количество проемов. Далее, если здание будет иметь много проемов, то после окончания процесса обтекания не произойдет всестороннего сжатия, возникающего вследствие того, что давление снаружи здания больше, чем внутри.

Нагрузка торможения

III.54. В течение всей фазы сжатия ударной волны (и короткого промежутка времени после нее) сооружение будет испытывать нагрузку от скоростного напора (нагрузку торможения), возникающего вследствие движения массы воздуха позади фронта ударной волны. Подобно нагрузке обтекания, нагрузка торможения (особенно в дальней зоне) представляет собой сдвигающую силу, приложенную к сооружению или объекту, подвергающемуся воздействию ударной волны.

III.55. За исключением случаев, когда ударная волна является очень мощной, скоростной напор, действующий на переднюю стенку сооружения, значительно меньше максимального избыточного давления (см. табл. III.11). Однако нагрузка от скоростного напора может оказывать воздействие на сооружение в течение несколько более длительного времени по сравнению с нагрузкой обтекания. В § III.15 указывалось, что продолжительность фазы сжатия ударной волны ядерного взрыва мощностью 1 млн. *т* на расстоянии 1,6 *км* от эпицентра составляет около 2 секунд. С другой стороны, нагрузка обтекания даже для большого сооружения действует только в течение малой доли секунды.

III.56. Действие нагрузки от скоростного напора на сооружения составляет важную особенность ядерного взрыва. При одном и том же максимальном избыточном давлении в ударной волне ядерный взрыв будет более разрушительным, чем взрыв обычной фугасной бомбы, особенно для зданий, чувствительных к нагрузкам от скоростного напора. Это объясняется тем, что при взрыве обычной бомбы ударная волна имеет значительно меньшую продолжительность действия, измеряемую несколькими тысячными долями секунды. При ядерных взрывах вследствие увеличения длительности фазы сжатия ударная волна производит больше разрушений, чем можно было бы ожидать, если исходить только из величины максимального избыточного давления.

Характеристики сооружений и нагрузки, создаваемые воздушной ударной волной

III.57. При рассмотрении вопросов устойчивости сооружений к действию нагрузок от взрыва с точки зрения количественных соотношений (см. главу VI) или с точки зрения качественного анализа (последние вопросы рассматриваются в данной главе) сооружения целесообразно разделить на две категории, а именно: на сооружения, чувствительные к нагрузке обтекания, и на сооружения, чувствительные к нагрузке торможения. Однако следует подчеркнуть, что такое разделение вводится для того, чтобы упростить рассмотрение сложных процессов взаимодействия объектов с ударной волной. Хотя и справедливо, что одни конструкции реагируют главным образом на нагрузки обтекания, а другие на нагрузки торможения, в действительности же все сооружения будут реагировать на нагрузки того и другого типа. Роль каждого типа нагрузок будет зависеть от типа конструкции, а также от характеристик ударной волны. Это следует иметь в виду при последующем рассмотрении вопросов действия ударной волны на сооружения.

III.58. Большие здания, имеющие сравнительно небольшие оконные и дверные проемы и прочные наружные стены, чувствительны главным образом к нагрузкам обтекания. Это объясняется тем, что для охвата такого здания ударной волной требуется значительное время, в течение которого действует перепад давлений на передней и задней стенах здания. Примером сооружений, на которые воздействует главным образом нагрузка обтекания, являются многоэтажные здания с железобетонными каркасами, имеющие небольшие оконные проемы, большие многоквартирные дома с несущими стенами и жилые здания с деревянными каркасами.

III.59. Так как даже для больших сооружений время действия нагрузки обтекания составляет лишь некоторую долю продолжительности действия ударной волны, то длительность последней не будет иметь какого-либо существенного влияния на разрушения. Другими словами, ударная волна большой продолжительности действия не будет оказывать значительного влияния на величину результирующей нагрузки (или на степень разрушения) в процессе обтекания сооружения. Поэтому сооружения, чувствительные к нагрузкам обтекания, реагируют главным образом на изменение максимального избыточного давления ударной волны; непосредственно же величина нагрузки обтекания определяется в основном величиной давления отражения, которое может в несколько раз превышать избыточное давление падающей ударной волны (см. § III.81).

III.60. Если давление на различные части сооружения (или элементы сооружения) очень быстро выравнивается, что имеет

место при небольших размерах и характерной форме сооружения (элемента) или при мгновенном образовании многочисленных брешей в результате разрушений, то нагрузка обтекания действует в течение очень короткого времени. В этом случае степень разрушения сооружения зависит главным образом от скоростного напора (или силы торможения). Типичными примерами объектов, чувствительных к нагрузкам от скоростного напора, являются дымовые трубы, телефонные столбы, радио- и телевизионные антенны, опоры высоковольтных линий электропередач, мосты со сквозными фермами и т. п. Для обтекания ударной волной одного из таких сооружений или составляющих его элементов требуется настолько короткое время, что действием нагрузки обтекания можно пренебречь, тогда как нагрузка от скоростного напора может иметь значительную величину.

III.61. Нагрузка торможения определяется не только скоростным напором, но также и формой сооружения (или элемента сооружения), на которое она действует. Для закругленных или хорошо обтекаемых объектов коэффициент, учитывающий форму (или коэффициент торможения), имеет меньшую величину, чем для неровных или остроугольных сооружений (или его элементов). Например, нагрузка на единицу площади телефонного столба или дымовой трубы будет меньше, чем на единицу площади двутавровой балки.

III.62. Здания с металлическим (или железобетонным) каркасом и легкими стенами из асбоцементовых, алюминиевых панелей или панелей из волнистой стали чувствительны к нагрузкам торможения, так как их стены разрушаются при сравнительно низком избыточном давлении. Это разрушение, сопровождаемое выравниванием давления, происходит сразу же по достижении ударной волной сооружения, так что каркас подвергается действию сравнительно небольшой нагрузки обтекания. Повреждения каркаса и узких элементов сооружения, например колонн, балок и ферм, вызываются тогда силой скоростного напора.

III.63. Для сооружений, которые в основном подвержены действию сил, вызываемых скоростным напором, или которые быстро становятся чувствительными к таким силам в результате воздействия ударной волны, степень повреждения определяется как величиной этих сил, так и длительностью их действия. Таким образом, степень повреждения зависит от времени действия фазы сжатия, а также от величины избыточного давления, от которого зависит скоростной напор. Следовательно, для данной величины максимального избыточного давления сооружения, чувствительные к нагрузкам от скоростного напора, получают больше повреждений при более мощном взрыве, чем при взрыве меньшей мощности, ввиду большей длительности фазы сжатия при взрыве более мощной бомбы.

Радиусы зон разрушения сооружений

Правила вычисления

III.64. Радиус (или площадь) зоны разрушения определенной степени зависит, конечно, от мощности взрыва, а также от его высоты. Как будет показано в соответствующем разделе данной главы (§ III.78 и далее), закон подобия позволяет установить зависимость между расстоянием, на котором максимальное избыточное давление приобретает определенную величину, и мощностью взрыва. Это в свою очередь дает возможность для сооружений, разрушающихся главным образом от действия нагрузки обтекания, когда главным фактором, определяющим устойчивость сооружения к действию ударной волны, является максимальное избыточное давление, легко оценить радиус зоны, в которой сооружения этого типа не будут разрушены при взрыве данной мощности.

III.65. При эквивалентных высотах взрыва (см. § III.27, а также § III.87) радиусы зон разрушения для определенного типа сооружений, чувствительных к нагрузкам обтекания, увеличиваются пропорционально корню кубическому из тротилового эквивалента, а площади зон разрушения — пропорционально тротиловому эквиваленту в степени $^2/_3$. Это означает, например, что увеличение тротилового эквивалента в 1000 раз приведет к увеличению радиуса зоны разрушений сооружений указанного типа примерно в 10 раз. При этом площадь зоны разрушений увеличится примерно в 100 раз.

III.66. В тех случаях, когда степень разрушения сооружений в какой-то мере зависит и от нагрузок торможения, действующих в течение всей фазы сжатия ударной волны, кроме максимального избыточного давления, важное значение имеет длительность этой фазы. Чем больше мощность бомбы, тем больше расстояние от центра взрыва, на котором максимальное избыточное давление имеет заданную величину, и тем больше время действия фазы сжатия при данном избыточном давлении. Поскольку с увеличением времени действия давления данной величины увеличивается разрушение, вызванное действием сил торможения, то разрушения одного и того же типа будут наблюдаться в области более низкого избыточного давления. Поэтому для сооружений, чувствительных к нагрузкам торможения, радиусы разрушений увеличиваются в большей степени, чем по правилу кубического корня для сооружений, чувствительных к нагрузкам обтекания. Другими словами, в результате увеличения тротилового эквивалента бомбы в 1000 раз радиус зоны разрушений данного типа для сооружений, чувствительных к нагрузкам торможения, увеличится более чем в 10 раз, а площадь зоны разрушения — более чем в 100 раз.

ФАКТОРЫ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СООРУЖЕНИЙ К ДЕЙСТВИЮ ВЗРЫВА

Прочность и масса

III.67. Устойчивость сооружений к воздействию ударной волны, образующейся при ядерном взрыве, зависит от свойств этих сооружений. К этим свойствам относятся прочность сооружения и его масса, общее конструктивное решение сооружения и пластичность материалов, из которых изготовлены элементы сооружения.

III.68. Основным критерием для оценки устойчивости сооружения к действию ударной волны является его прочность. Термин **прочность** применяется здесь для характеристики весьма общих свойств сооружения, на которые влияют многие факторы, одни из которых являются очевидными, а другие нет. Наиболее очевидным показателем прочности конструкции является, конечно, ее массивность, но прочность зависит в большой степени и от других менее очевидных факторов, например: от пластичности, упругости каркаса, прочности балок и угловых соединений, от количества стоек и диагональных связей в каркасной конструкции. Некоторые из этих факторов будут рассмотрены ниже.

III.69. Самыми прочными сооружениями являются здания с тяжелыми стальными и железобетонными каркасами. Наименее прочными, по-видимому, являются некоторые промышленные сооружения типа ангаров, имеющие легкие каркасы и большие пролеты. Некоторые другие типы легких каркасных сооружений также относятся к последней категории, но хорошо сконструированные каркасные здания имеют бо̀льшую прочность.

III.70. Сооружения, имеющие несущие стены, например из кирпича или бетонных блоков без жесткого каркаса, обладают невысокой устойчивостью к действию ударной волны. Причиной этого является малая упругость материала этих сооружений и незначительная прочность соединений, подвергающихся воздействию горизонтальной составляющей нагрузки ударной волны. Как будет показано в соответствующих параграфах, при усилении сооружений этого типа стальным каркасом значительно увеличивается их прочность.

Влияние конструкции сооружений

III.71. За исключением районов, где возможны довольно сильные землетрясения, сооружения в Соединенных Штатах, как правило, рассчитаны на то, чтобы выдерживать горизонтально направленные нагрузки только от ветра средней силы. При расчете сооружений такие нагрузки рассматриваются как статические (не изменяющиеся во времени), так как естественные ветры усиливаются сравнительно медленно и являются довольно устойчивыми. Однако

горизонтальная нагрузка, создаваемая ударной волной ядерного взрыва, носит скорее динамический, чем статический характер; эта нагрузка действует в течение короткого промежутка времени, примерно около секунды. Инерция, определяемая массой сооружения или его частей, является важным фактором, который следует учитывать при оценке устойчивости сооружения к горизонтальной динамической нагрузке, хотя этот фактор не имеет существенного значения при статической нагрузке.

III.72. Из существующих типов сооружений, вероятно, меньше всего будут повреждены ударной волной те типы, которые рассчитаны на воздействие землетрясений и которые способны выдерживать боковые нагрузки, равные приблизительно 10% от их веса. Такие сооружения, усиленные прочными внутренними поперечными стенами и не имеющие разрывов в соединениях (что обеспечивает их дополнительную жесткость), смогут противостоять без серьезных повреждений действию значительных горизонтальных сил.

Влияние пластичности

III.73. Пластичность означает способность материала или сооружения неупруго поглощать энергию, не разрушаясь. Другими словами, чем больше пластичность, тем больше способность сооружения противостоять действию разрушающих сил. Хрупкие материалы имеют плохую пластичность и легко разрушаются.

III.74. Здесь целесообразно рассмотреть две основные стороны пластичности. Если приложенная к материалу нагрузка вызывает в нем деформацию, что имеет, например, место при атомном взрыве, то первоначальная деформация является **упругой**; если материал за время действия нагрузки находится в области упругих деформаций, то после снятия нагрузки он приобретает свою первоначальную форму. Однако если напряжения, возникающие в результате приложения нагрузки, достаточно велики, то материал переходит в зону **пластических** деформаций. В этом случае материал после снятия нагрузки не восстановит полностью своей первоначальной формы, хотя разрушения еще не произойдет. Только когда напряжения достигают предела прочности, происходит разрушение.

III.75. В идеальном случае, для того чтобы сооружение могло быть устойчивым к действию ударной волны, оно должно обладать максимальной упругостью. К сожалению, строительные материалы, вообще говоря, не способны поглощать много энергии в области упругой деформации, хотя многие обычные материалы могут поглощать, не разрушаясь, большое количество энергии в области пластических деформаций. Следовательно, проблема конструирования сооружений, устойчивых к действию ударной волны, заключается в определении допустимой величины пластической деформации, при которой сооружение не подвергнется разрушению. Величина допустимой деформации, конечно, будет зависеть от характера и

назначения сооружения. Безусловно, деформация, приводящая к полному разрушению сооружения, неприемлема, но несколько меньшая деформация, не приводящая к разрушениям, которые будут серьезно препятствовать дальнейшему использованию сооружения, может рассматриваться как допустимая.

III.76. Очевидно, что строительные материалы, предназначенные для сооружений, способных противостоять действию ударной волны, должны обладать пластичностью. Этим свойством в полной мере обладают конструктивная сталь и стальная арматура. Они способны поглощать большое количество энергии ударной волны, не разрушаясь, и таким образом уменьшать возможность разрушения сооружения, в котором они используются. Кроме того, сталь имеет то преимущество, что ее предел упругости при динамических нагрузках выше, чем при статических.

III.77. Бетон сам по себе не является пластичным материалом, но при применении его вместе со сталью, например в железобетонных конструкциях, пластичность стали становится, как правило, свойством конструкции в целом. Следовательно, сооружение из железобетона будет обладать значительной пластичностью, а значит, и сопротивляемостью по отношению к воздействию ударной волны. Кирпичные или каменные стены без усиления их каркасом совершенно не обладают пластичностью и, как указано выше, легко разрушаются.

ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Свойства воздушной волны у поверхности

III.78. В предыдущих разделах данной главы была рассмотрена качественная картина образования и развития ударной волны. Последующие разделы будут посвящены анализу некоторых количественных сторон действия ударной волны в воздухе [2].

Основные соотношения между параметрами ударной волны, имеющей резко выраженный фронт, на котором происходит разрыв непрерывности давления, получаются из условий Ренкина — Гюгонио, вытекающих из законов сохранения массы, энергии и количества движения для фронта ударной волны. Эти условия вместе с уравнением состояния среды (воздуха) позволяют вывести необходимые зависимости, связывающие скорость движения фронта ударной волны, скорость движения массы воздуха за фронтом, избыточное давление, скоростной напор и плотность воздуха во фронте идеальной ударной волны.

III.79. Свойства ударной волны в ближней зоне ее распространения (в области регулярного отражения) достаточно сложны и за

---

[1] Этот раздел при чтении данной главы может быть опущен.

[2] Вопросы, связанные с определением величины нагрузок и деформаций, образующихся от действия ударной волны, будут рассмотрены в главе VI.

висят от угла падения волны и ее энергии. При контактном взрыве, когда образуется только одна полусферическая (слившаяся) волна, как это указано в § III.29, и в зоне нерегулярного отражения ударной волны (ниже траектории тройной точки) при воздушном взрыве, различные характеристики фронта ударной войны связаны уравнениями Ренкина — Гюгонио. Именно для этих условий, когда имеется лишь один фронт ударной волны, возможно получить следующие результаты.

III.80. Скорость ударной волны U и массовая скорость движения (или максимальная скорость потока воздуха за фронтом ударной волны) u определяются уравнениями:

$$U = c_0\left(1 + \frac{6p}{7P_0}\right)^{1/2}$$

и

$$u = \frac{5p}{7P_0} \cdot \frac{c_0}{\left(1 + \frac{6p}{7P_0}\right)^{1/2}},$$

где p — максимальное избыточное давление во фронте ударной волны;

P_0 — давление окружающего воздуха перед фронтом ударной волны;

c_0 — скорость звука в окружающей атмосфере (впереди фронта ударной волны).

Плотность воздуха ρ за фронтом ударной волны связана с плотностью воздуха окружающей атмосферы ρ_0 выражением

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{7 + \frac{6p}{P_0}}{7 + \frac{p}{P_0}}.$$

Скоростной напор q определяется выражением

$$q = \frac{1}{2}\rho u^2.$$

Заменяя ρ и u соответствующими выражениями из уравнений Ренкина — Гюгонио, получаем выражение для величины максимального скоростного напора

$$q = \frac{5}{2}\,\frac{p^2}{7P_0 + p}.$$

Изменение скорости распространения ударной волны, скорости частиц воздуха (или максимальной скорости потока массы воздуха) и скоростного напора в зависимости от максимального избыточного давления показано графически на рис. III.80.

III.81. Если направление распространения ударной волны перпендикулярно лобовой поверхности сооружения, то при достижении волной этой поверхности мгновенная величина избыточного давления отражения p_r определяется из равенства

$$p_r = 2p\left(\frac{7P_0 + 4p}{7P_0 + p}\right). \qquad \text{(III.81.1)}$$

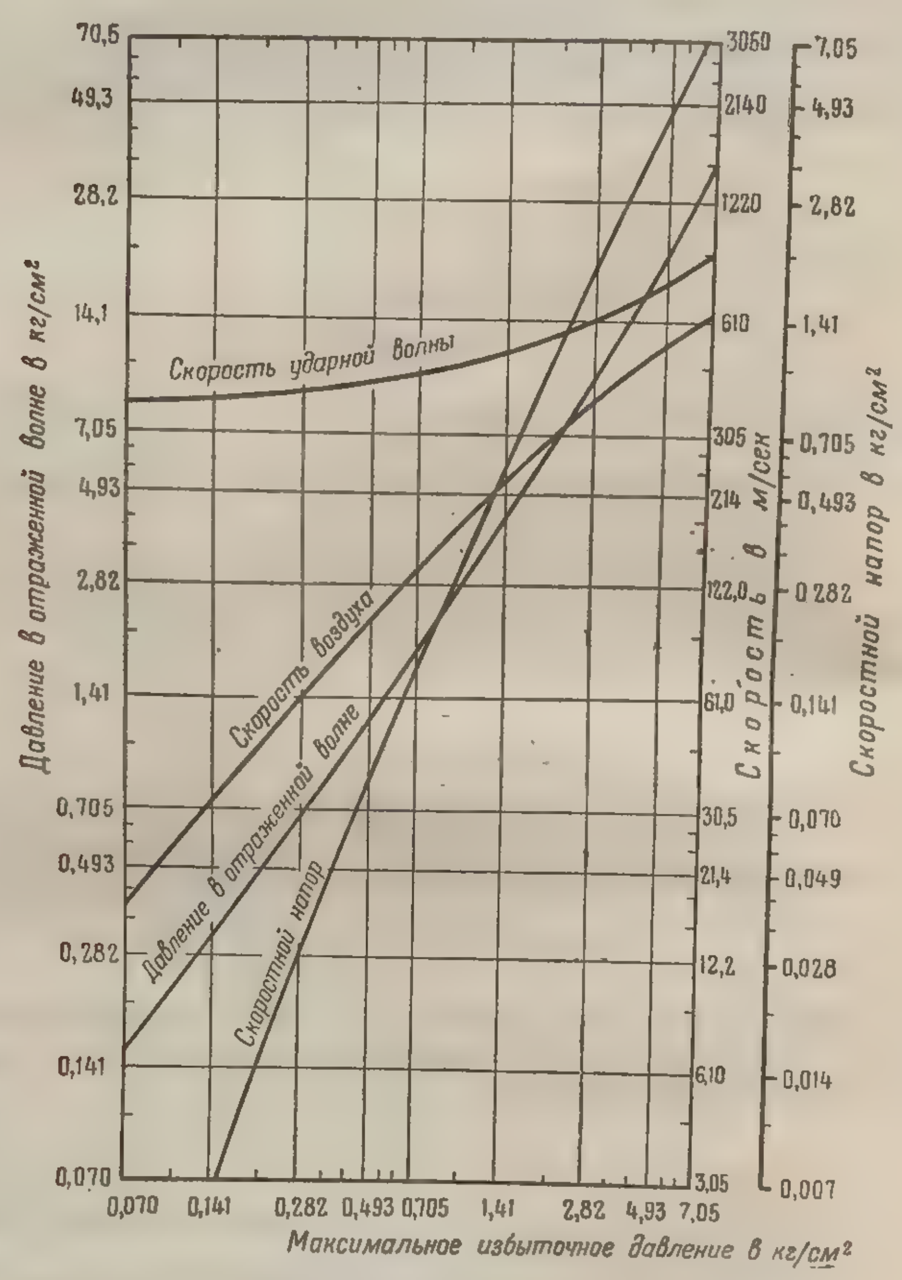


Рис. III.80. Зависимость параметров ударной волны во фронте от величины максимального избыточного давления

Из этого выражения можно видеть, что величина p_r приближается к величине $8p$ для больших значений избыточного давления в падающей ударной волне (сильные волны) и стремится к $2p$ для малых значений избыточного давления (слабые волны). Кривая, показывающая изменение мгновенной величины давления в отраженной ударной волне в зависимости от величины максимального избыточного давления в падающей ударной волне, также приведена на рис. III.80.

III.82. Уравнения, приведенные в § III.80, определяют максимальные величины различных параметров во фронте ударной волны. Однако, как было показано выше, избыточное давление и скоростной напор уменьшаются во времени, хотя и в разной степени. Во многих случаях изменение избыточного давления во времени в данной точке за фронтом ударной волны может быть представлено простым эмпирическим выражением

$$p(t) = p\left(1 - \frac{t}{t_+}\right)e^{-t/t_+}, \qquad \text{(III.82.1)}$$

где $p(t)$ — избыточное давление в любой момент времени t после прихода фронта ударной волны в данную точку;

p — максимальное избыточное давление;

t_+ — продолжительность фазы сжатия ударной волны.

Это выражение представлено графически на рис. III.82, где «приведенное» избыточное давление, т. е. давление в любой момент времени, отнесенное к максимальному избыточному давлению, изменяется в зависимости от приведенного времени, т. е. времени, отнесенного к продолжительности фазы сжатия. Следует отметить, что в случае взаимодействия ударной волны с сооружением это выражение можно использовать для определения нагрузок от ударной волны.

III.83. Подобное эмпирическое выражение для определения величины скоростного напора в любой момент времени после прихода фронта ударной волны имеет вид

$$q(t) = q\left(1 - \frac{t}{t_+}\right)^2 e^{-2t/t_+},$$

где $q(t)$ — скоростной напор в любой момент времени t после прихода фронта ударной волны в данную точку;

q — максимальный скоростной напор.

Графически это выражение представлено на рис. III.82.

III.84. Другим важным параметром, определяющим степень разрушения, вызванного действием ударной волны, является **импульс**, который учитывает продолжительность действия фазы сжатия и изменение избыточного давления в течение этого времени. Величина импульса может быть определена как суммарная площадь, расположенная под кривой изменения избыточного давления

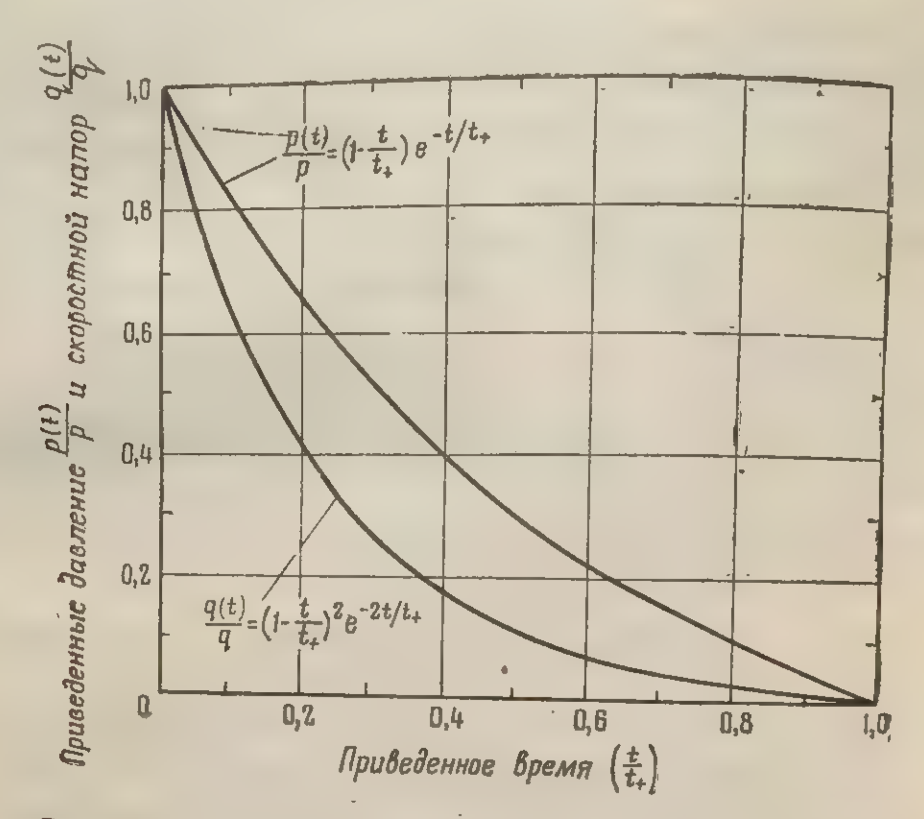


Рис. III.82. Зависимость приведенных избыточного давления и скоростного напора от приведенного времени

во времени для данной точки, показанной на рис. III.82. Следовательно, удельный импульс избыточного давления фазы сжатия I (приходящийся на единицу площади) может быть представлен в виде интеграла

$$I=\int_0^{t_+} p(t)\,dt,$$

где $p(t)$ может быть выражено аналитически при помощи зависимости (III.82.1). Импульс скоростного напора фазы сжатия может быть определен при помощи аналогичного выражения, в котором $p(t)$ заменено на $q(t)$.

III.85. Для вычисления параметров ударной волны, образующейся при ядерном взрыве любой заданной мощности, используется закон подобия; при этом должны быть известны соответствующие параметры взрыва бомбы другой мощности. При помощи этого закона можно выразить в простой форме изменение величин для большого диапазона мощностей. Одним из применяемых для этого методов, который будет приведен ниже, является построение кривых, показывающих, как для бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* изменяются различные параметры ударной волны у поверхности с увеличением расстояния от центра взрыва. Имея эти зависимости и используя закон подобия, можно легко

определить параметры ударной волны для взрыва бомбы любой заданной мощности.

III.86. Теоретически данное давление будет иметь место на таком расстоянии от центра взрыва, которое пропорционально кубическому корню из тротилового эквивалента. Испытания показали, что эта зависимость между расстоянием и тротиловым эквивалентом справедлива для бомб с тротиловым эквивалентом порядка миллионов тонн. Таким образом, правило кубического корня может быть с уверенностью применено для взрывов с широким диапазоном мощностей. Согласно этому закону, если D_0 представляет расстояние от эталонного взрыва с тротиловым эквивалентом W_0 тыс. *т*, на котором избыточное давление или скоростной напор имеют определенную величину, то для всякого другого взрыва с тротиловым эквивалентом W тыс. *т* давление той же величины будет действовать на расстоянии D, определяемом из выражения

$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{W}{W_0}\right)^{1/3}. \qquad \text{(III.86.1)}$$

Как указывалось выше, в качестве эталонной бомбы удобно выбрать бомбу с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т*; при этом $W_0 = 1$. Тогда из уравнения (III.86.1) следует

$$D = D_0 W^{1/3}, \qquad \text{(III. 86.2)}$$

где D_0 — расстояние от центра взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*.

Следовательно, если задано расстояние D, то можно вычислить мощность W взрыва, который вызовет данный эффект, т. е. максимальное избыточное давление определенной величины. Или наоборот, если известна мощность взрыва W, то соответствующее расстояние D может быть получено из выражения III.86.2.

III.87. При сравнении воздушных взрывов различной мощности целесообразно ввести приведенную высоту взрыва, определяемую соотношением:

$$\text{приведенная высота взрыва} = \frac{\text{действительная высота взрыва}}{W^{1/3}}.$$

Отсюда легко можно видеть, что для взрывов различной мощности, имеющих одну и ту же приведенную высоту взрыва, закон кубического корня может применяться как для определения расстояний от эпицентра, так и для определения расстояний от центра взрыва. Например, если d_0 представляет собой расстояние от эпицентра, на котором избыточное давление (или скоростной напор) имеет определенную величину при взрыве с мощностью в 1 тыс. *т*, то для взрыва мощностью W тыс. *т* то же самое давление будет наблюдаться на расстоянии, определяемом выражением

$$d = d_0 W^{1/3}. \qquad \text{(III.87.1)}$$

Это выражение можно применять в тех же случаях, которые указаны в предыдущем параграфе; следует иметь только в виду, что расстояния в данном выражении измеряются от эпицентра, а не от центра взрыва.

III.88. Закон подобия может быть также применен к времени прихода фронта ударной волны в данную точку, продолжительности фазы сжатия и величине импульса. Соотношения этих величин могут быть выражены в следующей форме:

$$\frac{t}{t_0}=\frac{d}{d_0}=\left(\frac{W}{W_0}\right)^{1/3} \text{ и } \frac{I}{I_0}=\frac{d}{d_0}=\left(\frac{W}{W_0}\right)^{1/3},$$

где t_0 — время движения ударной волны до данной точки или продолжительность фазы сжатия;

I_0 — импульс избыточного давления в фазе сжатия, относящийся к взрыву эталонной бомбы с тротиловым эквивалентом W_0;

t и I — время и импульс, которые относятся к любому взрыву мощностью W;

d_0 и d — расстояния от эпицентра взрыва.

Если $W_0 = 1$ тыс. *т*, то различные величины будут связаны между собой следующим образом:

$$t=t_0 W^{1/3} \text{ на расстоянии } d=d_0 W^{1/3}$$

и

$$I=I_0 W^{1/3} \text{ на расстоянии } d=d_0 W^{1/3}.$$

Примеры использования вышеприведенных выражений будут даны ниже.

Поправки, учитывающие влияние высоты

III.89. Вышеприведенные выражения применимы для совершенно однородной атмосферы, т. е. когда давление и температура окружающего воздуха в районе взрыва и цели являются одинаковыми для каждого случая. Если же условия в окружающей атмосфере не одинаковы для двух сопоставляемых взрывов, то должны быть внесены поправки, о чем указывалось в § III.39. Ниже дано общее выражение, учитывающее возможность того, что абсолютная температура T и давление окружающего воздуха P не равны соответствующим величинам T_0 и P_0, относящимся к взрыву эталонной бомбы (тротиловый эквивалент — 1 тыс. *т*).

Для избыточного давления

$$p=p_0\frac{P}{P_0},$$

где p и p_0 — соответствующие величины избыточного давления на заданном расстоянии.

Тогда исправленное расстояние для заданного давления определится выражением

$$d = d_0 W^{1/3}\left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/3};$$

время прихода ударной волны в данную точку или продолжительность фазы сжатия на соответствующем приведенном расстоянии определяется зависимостью

$$t = t_0 W^{1/3}\left(\frac{P_0}{P}\right)^{1/3}\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}.$$

III.90. Можно заметить, что, когда $T = T_0$ и $P = P_0$, эти выражения превращаются в соответствующие равенства, приведенные в § III.86 и § III.87 для одинаковых условий. Как правило, величины параметров ударной волны эталонного взрыва (которые будут приведены ниже) даются для стандартной атмосферы на уровне моря, где P_0 равно 1,03 *кг/см²* и температура 15° С или $T_0 = 288°$ К. Как отмечено выше в § III.39, для взрывов на высоте до 1500 *м* над уровнем моря эти поправки имеют небольшую величину (не более нескольких процентов).

Стандартные кривые и вычисление параметров ударной волны

III.91. Для оценки степени разрушений, которые можно ожидать на определенном расстоянии от центра взрыва данной мощности, необходимо определить параметры ударной волны, изменяющиеся в зависимости от времени и расстояния. Поэтому в дополнение к уже приведенному выше общему анализу здесь даются типовые кривые различных параметров ударной волны, образующейся при ядерном взрыве в воздухе. Эти кривые показывают изменение максимального избыточного давления, максимального скоростного напора, времени прихода волны в заданную точку, продолжительности фазы сжатия и импульса избыточного давления в зависимости от расстояния до эпицентра как для наземного (надводного) взрыва, так и для типичного воздушного взрыва. Для воздушного взрыва дается также кривая, показывающая изменение траектории тройной точки, т. е. высоты головной ударной волны в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва.

III.92. При помощи этих кривых можно установить величины параметров ударной волны у поверхности земли; полученные данные могут быть использованы для определения нагрузок, действующих на определенные сооружения, а также для оценки устойчивости этих сооружений к действию различных нагрузок. Следует отметить, что эти данные характеризуют поведение ударной волны при средних условиях над плоской поверхностью на уровне моря. Величины максимального избыточного давления и скоростного напора можно рассматривать как основные данные, используемые

при оценке разрушающего действия ударной волны (подробно об этом сказано в гл. VI).

III.93. Типовые кривые характеризуют ударную волну, образующуюся при взрыве ядерного заряда, имеющего тротиловый эквивалент 1 тыс. *т*. Примеры, показывающие использование этих кривых, будут даны ниже, рядом с соответствующей кривой. Для упрощения вычислений на рис. III.93 приведен график, позволяющий находить значения кубического корня из величины тротилового эквивалента, требующиеся при применении закона подобия.

III.94. На рис. III.94а показано изменение максимального избыточного давления в зависимости от расстояния от центра наземного (надводного) взрыва мощностью в 1 тыс. *т*, а на рис. III.94б эта зависимость относится к типичному воздушному взрыву той же мощности. Для полноты картины на рис. III.94а дается также кривая избыточного давления во фронте падающей ударной волны (избыточное давление в так называемой «безграничной атмосфере»), построенная в предположении, что наземный (надводный) взрыв мощностью *W* тыс. *т* эквивалентен по параметрам ударной волны высокому воздушному взрыву мощностью 2*W* тыс. *т* до того, как произошло какое-либо отражение волн. Это будет справедливо, если считать землю абсолютно твердой отражающей поверхностью. В этом случае при наземном взрыве энергия, которая при высоком воздушном взрыве приходилась бы на нижнюю полусферу ударной волны, отражается от поверхности земли и суммируется с энергией верхней полусферы. Расстояния в этом случае (для безграничной атмосферы) представляют собой фактические дальности от центра взрыва.

На рис. III.94в показано изменение высоты фронта головной волны (определяемой траекторией тройной точки) при взрыве в воздухе ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т* в зависимости от расстояния до центра (эпицентра).

III.95. На рис. III.95 даны кривые, характеризующие изменение горизонтальных составляющих скоростного напора в зависимости от расстояния до эпицентра наземного (надводного) и типичного воздушного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т*. Вертикальная составляющая скоростного напора имеет значение только для ближней зоны в случае воздушного ядерного взрыва, в остальных случаях она составляет незначительную величину и ею можно пренебречь. Так как на графике указана величина только горизонтальной составляющей, то скоростной напор в ближней зоне распространения ударной волны для взрыва в воздухе начиная с некоторого расстояния от эпицентра взрыва уменьшается по мере уменьшения этого расстояния.

III.96. Зависимость времени прихода фронта ударной волны в заданную точку и продолжительности фазы сжатия ударной волны от расстояния до эпицентра для наземного (надводного)

взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т* и типичного воздушного взрыва той же мощности показана на рис. III.96.

III.97. Наконец, на рис. III.97 представлен график изменения

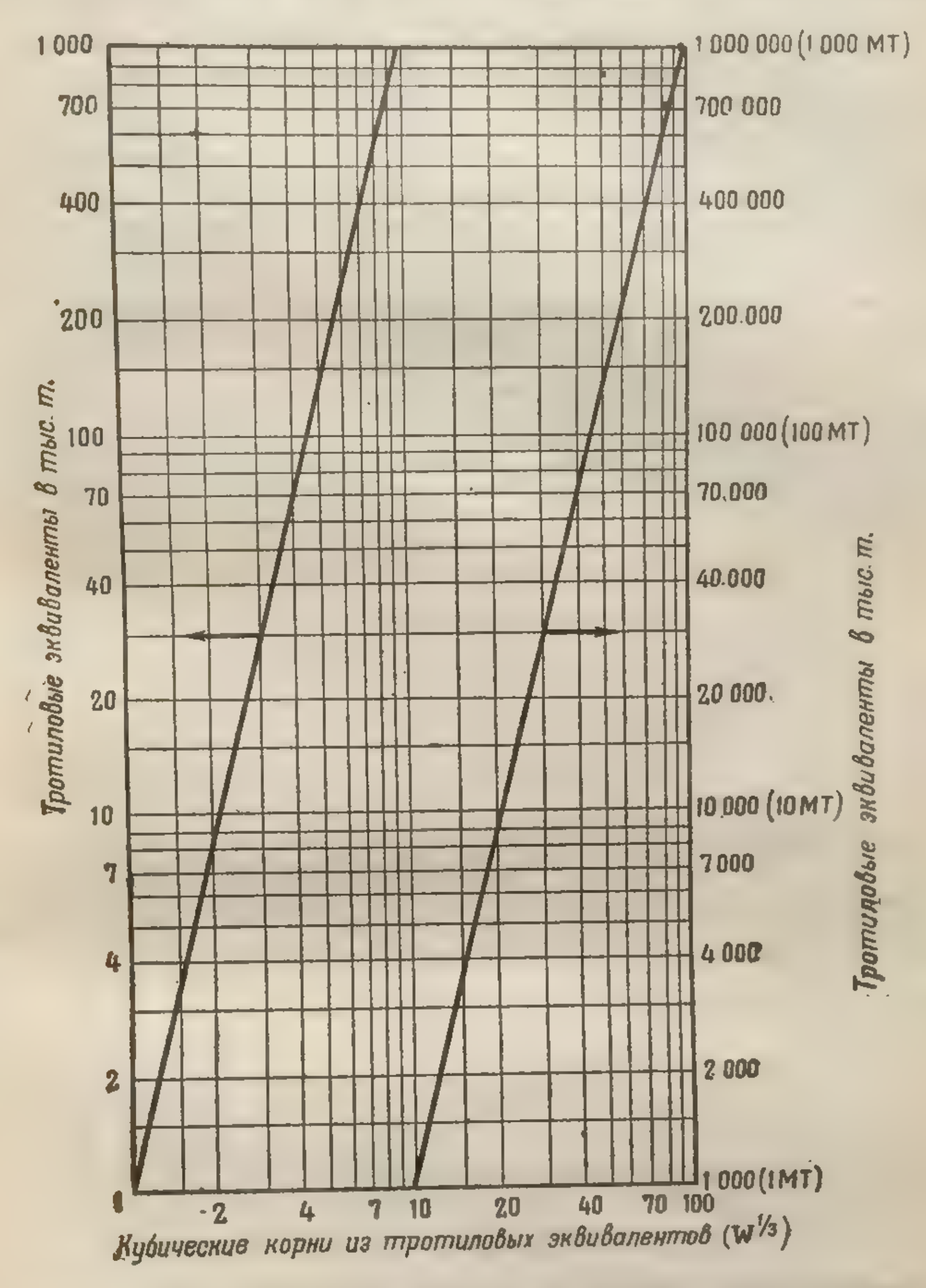


Рис. III.93. Значение кубического корня из величин тротиловых эквивалентов

величин импульсов избыточного давления в фазе сжатия и скоростного напора в зависимости от расстояния до центра (эпицентра) наземного (надводного) и типичного воздушного взрыва ядерного

заряда с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т*. Как во всех других случаях, данные графика относятся к взрыву в условиях стандартной атмосферы при среднем характере местности.

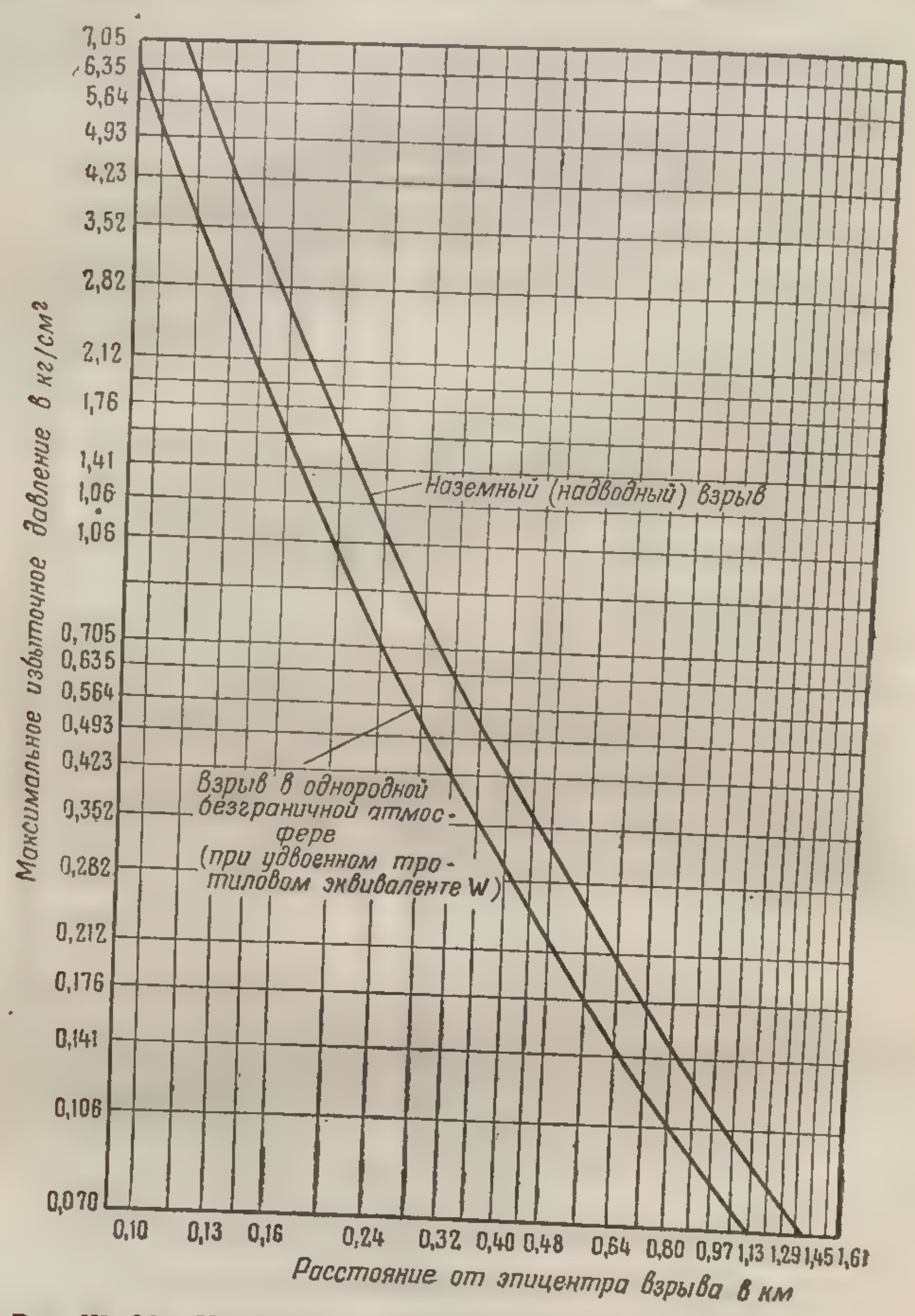


Рис. III. 94а. Изменение максимального избыточного давления при наземном (надводном) взрыве и взрыве в однородной безграничной атмосфере ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

Кривые (рис. III.94а) показывают изменение максимального избыточного давления в зависимости от расстояния для наземного (надводного) взрыва с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* и для воздушного взрыва той же мощности в безграничной атмосфере (кривая для воздушного взрыва построена на основе допущения об удвоении мощности (см. § III.94) в условиях стандартной атмосферы).

Для тротиловых эквивалентов, не равных 1 тыс. *т*, расстояние, на котором наблюдается ударная волна с избыточным давлением данной величины, изменяется пропорционально корню кубическому из величины тротилового эквивалента согласно выражению

$$d = d_0 W^{1/3},$$

где для заданной величины избыточного давления

d_0 — расстояние от места взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*;

d — расстояние от места взрыва бомбы мощностью W тыс. *т*.

Пример. Дано: бомба с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* взорвана на поверхности.

Определить расстояние, на котором будет наблюдаться избыточное давление, равное 0,14 *кг/см²*.

Решение: Из рис. III.93 находим, что корень кубический из 1000 равен 10. Из рис. III.94а устанавливаем, что максимальное избыточное давление 0,14 *кг/см²* наблюдается на расстоянии 0,86 *км* от центра наземного (надводного) взрыва мощностью в 1 тыс. *т*. Поэтому для наземного (надводного) взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* это расстояние будет составлять

$$d = d_0 W^{1/3} = 0{,}86 \times 10 = 8{,}6 \text{ км}.$$

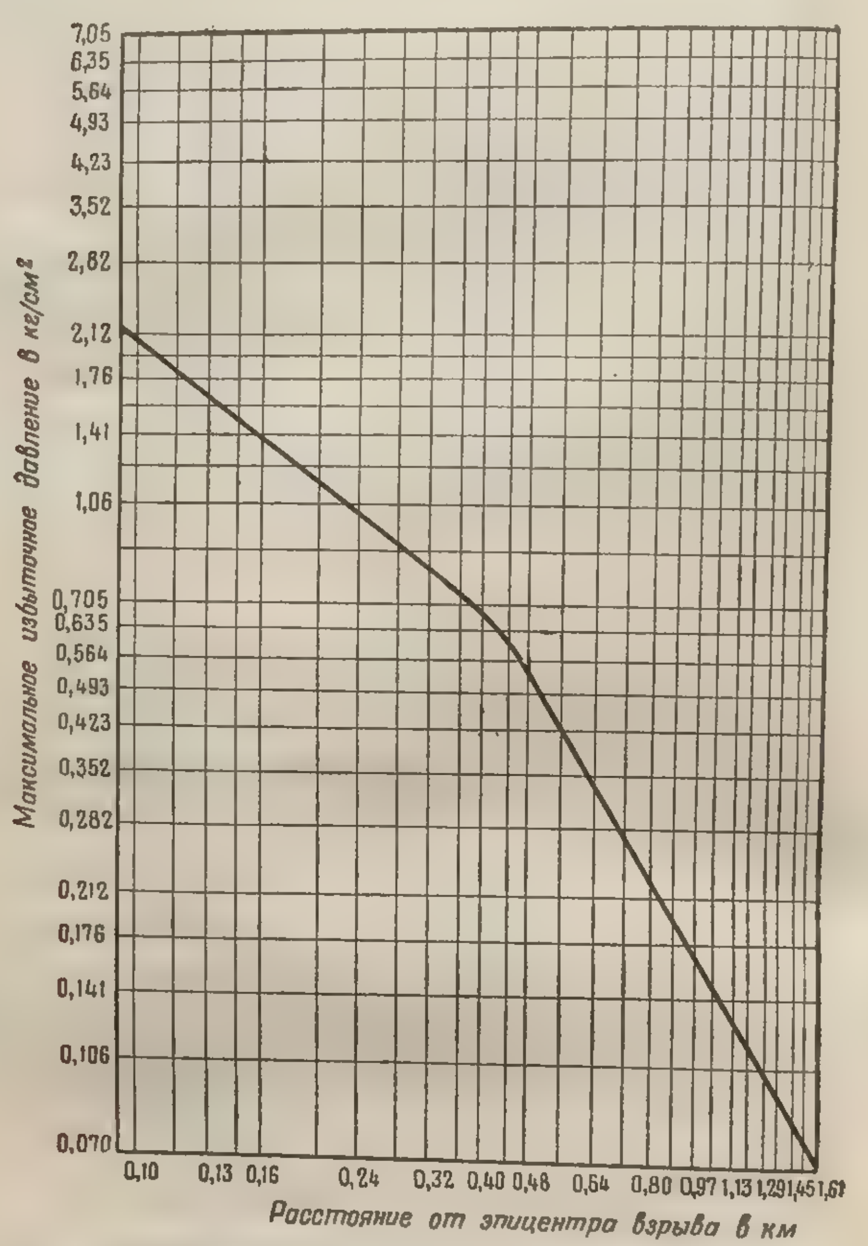


Рис. III.94б. Изменение максимального избыточного давления на поверхности земли при воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

Кривая (рис. III.94б) показывает изменение максимального избыточного давления на поверхности земли в зависимости от расстояния от эпицентра типичного воздушного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т* в условиях стандартной атмосферы при средних условиях на поверхности.

Для ядерных взрывов любой мощности расстояние, на котором наблюдается избыточное давление заданной величины, изменяется пропорционально корню кубическому из величины мощности взрыва, т. е.

$$d = d_0 W^{1/3},$$

где для заданного максимального избыточного давления

d_0 — расстояние от эпицентра взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*;

d — расстояние от эпицентра взрыва бомбы мощностью W тыс. *т*.

Пример. Дано: произведен типичный воздушный взрыв с тротиловым эквивалентом в 1 млн *т*.

Определить расстояние от эпицентра взрыва, на котором будет наблюдаться избыточное давление 0,57 *кг/см²*.

Решение: Из рис. III.93 находим, что корень кубический из 1000 равен 10. Из рис. III.94в устанавливаем, что максимальное избыточное давление 0,57 *кг/см²* наблюдается на расстоянии 0,45 *км* от эпицентра типичного воздушного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*. Поэтому для типичного воздушного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* это расстояние будет равно

$$d = d_0 W^{1/3} = 0{,}45 \times 10 = 4{,}5 \text{ км}.$$

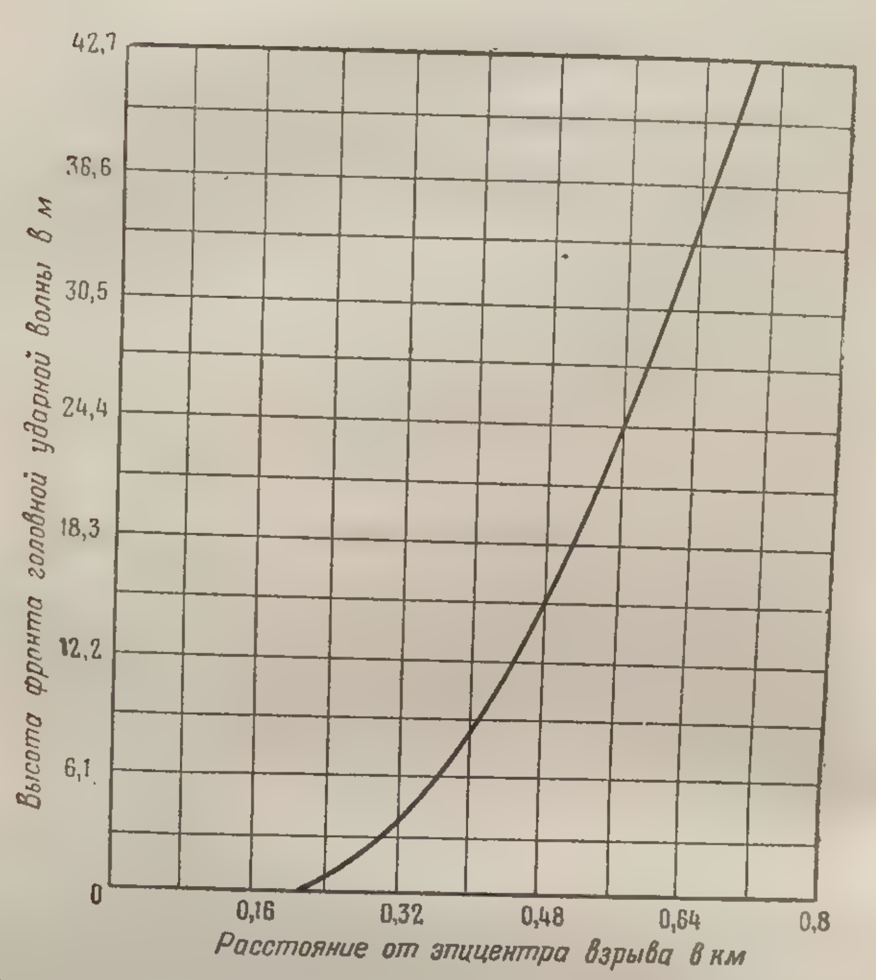


Рис. III.94в. Изменение высоты фронта головной ударной волны (траектория тройной точки) при воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

Кривая (рис. III.94в) показывает увеличение высоты фронта головной ударной волны в зависимости от расстояния от эпицентра типичного воздушного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т* в условиях стандартной атмосферы при средних условиях на поверхности земли.

Для тротиловых эквивалентов, не равных 1 тыс. *т*, высота фронта головной ударной волны и расстояние от эпицентра взрыва до начала области нерегулярного отражения изменяются пропорционально корню кубическому из тротилового эквивалента согласно следующим выражениям:

$$h = h_0 W^{1/3}; \ d = d_0 W^{1/3},$$

где h_0 — высота фронта головной волны на расстоянии d_0 от эпицентра взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*;

h — высота фронта головной волны на расстоянии d от эпицентра взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*.

Пример. Дано: произведен типичный воздушный взрыв с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т*.

Определить: а) расстояние от эпицентра, на котором начинается образование головной ударной волны; б) высоту фронта головной ударной волны на расстоянии 4,43 *км* от эпицентра.

Решение: а) Там, где начинается образование головной ударной волны, величины h и h_0 равны между собой, то есть равны нулю, так что в этом случае $d = d_0 W^{1/3}$. Из рис. III.93 находим, что корень кубический из 1000 равен 10, а из рис. III.94в устанавливаем, что появление головной волны при воздушном взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т* начинается на расстоянии 0,21 *км* от эпицентра. Следовательно, при взрыве в воздухе бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* соответствующее расстояние будет составлять

$$d = d_0 W^{1/3} = 0{,}21 \times 10 = 2{,}1 \ км;$$

б) расстояние d_0 для взрыва мощностью 1 тыс. *т*, соответствующее расстоянию 4,43 *км* для взрыва мощностью 1 млн. *т*, равно

$$d_0 = \frac{d}{W^{1/3}} = \frac{4{,}43}{10} = 0{,}443 \ км.$$

Высоту фронта головной ударной волны на этом расстоянии от эпицентра для воздушного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т* определяем из рис. III.94в; она составляет 12,2 *м*. Следовательно, для типичного воздушного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* соответствующая высота будет равна

$$h = h_0 W^{1/3} = 12{,}2 \times 10 = 122 \ м.$$

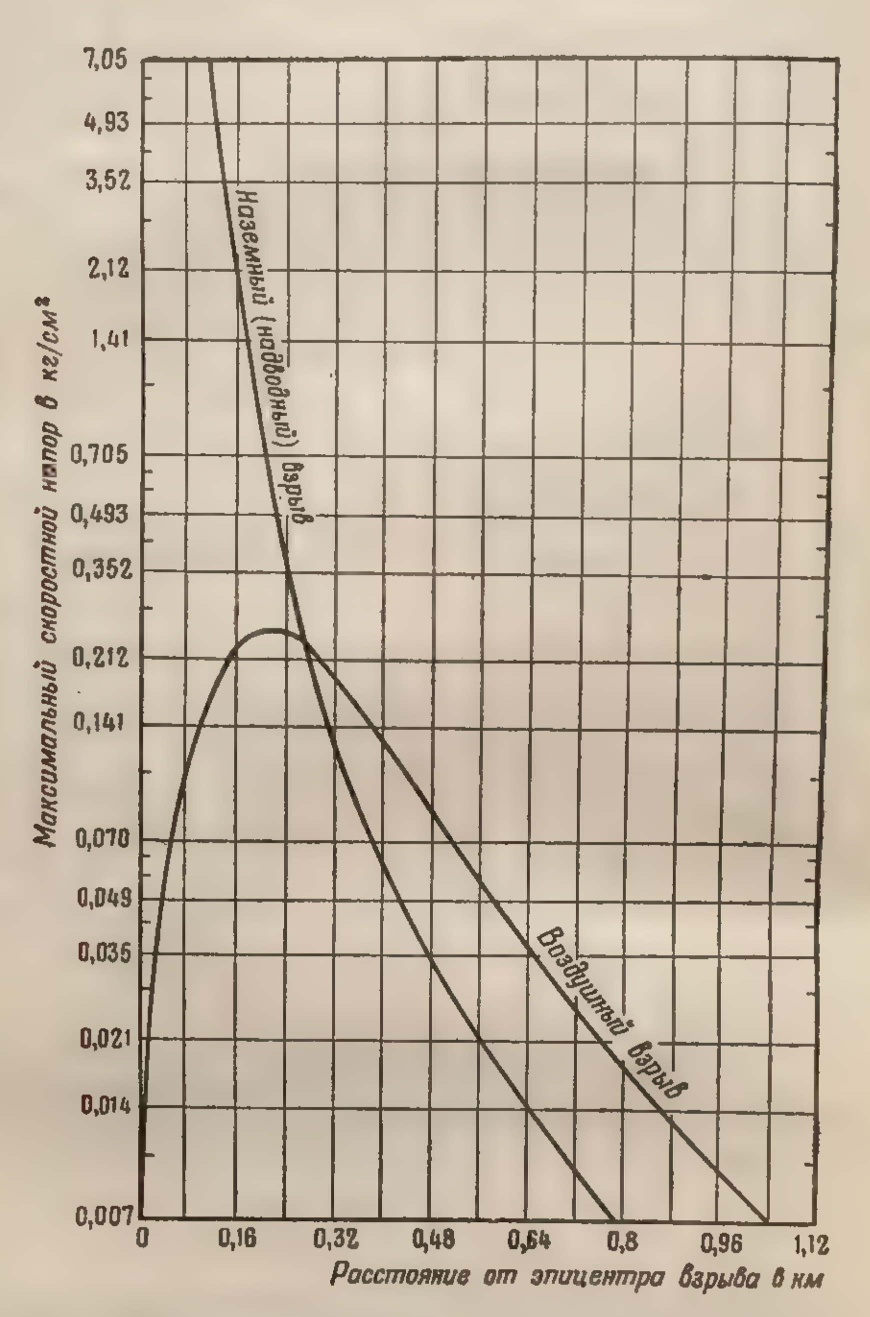


Рис. III.95. Изменение горизонтальной составляющей максимального скоростного напора при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

Кривые (рис. III.95) показывают изменение горизонтальной составляющей максимального скоростного напора в зависимости от расстояния от эпицентра (центра) для воздушного и наземного (надводного) взрывов бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т* в условиях стандартной атмосферы при средних условиях на поверхности земли.

Для тротиловых эквивалентов, отличных от 1 тыс. *т*, расстояние, на которое распространяется скоростной напор заданной величины, изменяется пропорционально корню кубическому из величины тротилового эквивалента

$$d = d_0 W^{1/3},$$

где для заданной величины максимального скоростного напора

d_0 — расстояние от эпицентра (центра) взрыва с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*;

d — расстояние от эпицентра (центра) взрыва с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*.

Пример. Дано: произведен наземный (надводный) взрыв бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т*.

Определить величину горизонтальной составляющей максимального скоростного напора на расстоянии 2,9 *км* от центра взрыва.

Решение: Из рис. III.93 находим, что корень кубический из 1000 равен 10. Тогда

$$d_0 = \frac{d}{W^{1/3}} = \frac{2,9}{10} = 0,29 \text{ км}$$ (для взрыва с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*).

Из рис. III.95 устанавливаем, что горизонтальная составляющая максимального скоростного напора на расстоянии 0,29 *км* от центра взрыва для наземного (надводного) взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* составляет 0,2 *кг/см*². Из этого следует, что при контактном наземном (надводном) взрыве мощностью 1 млн. *т* горизонтальная составляющая скоростного напора на расстоянии 2,9 *км* от центра взрыва будет равна 0,2 *кг/см*².

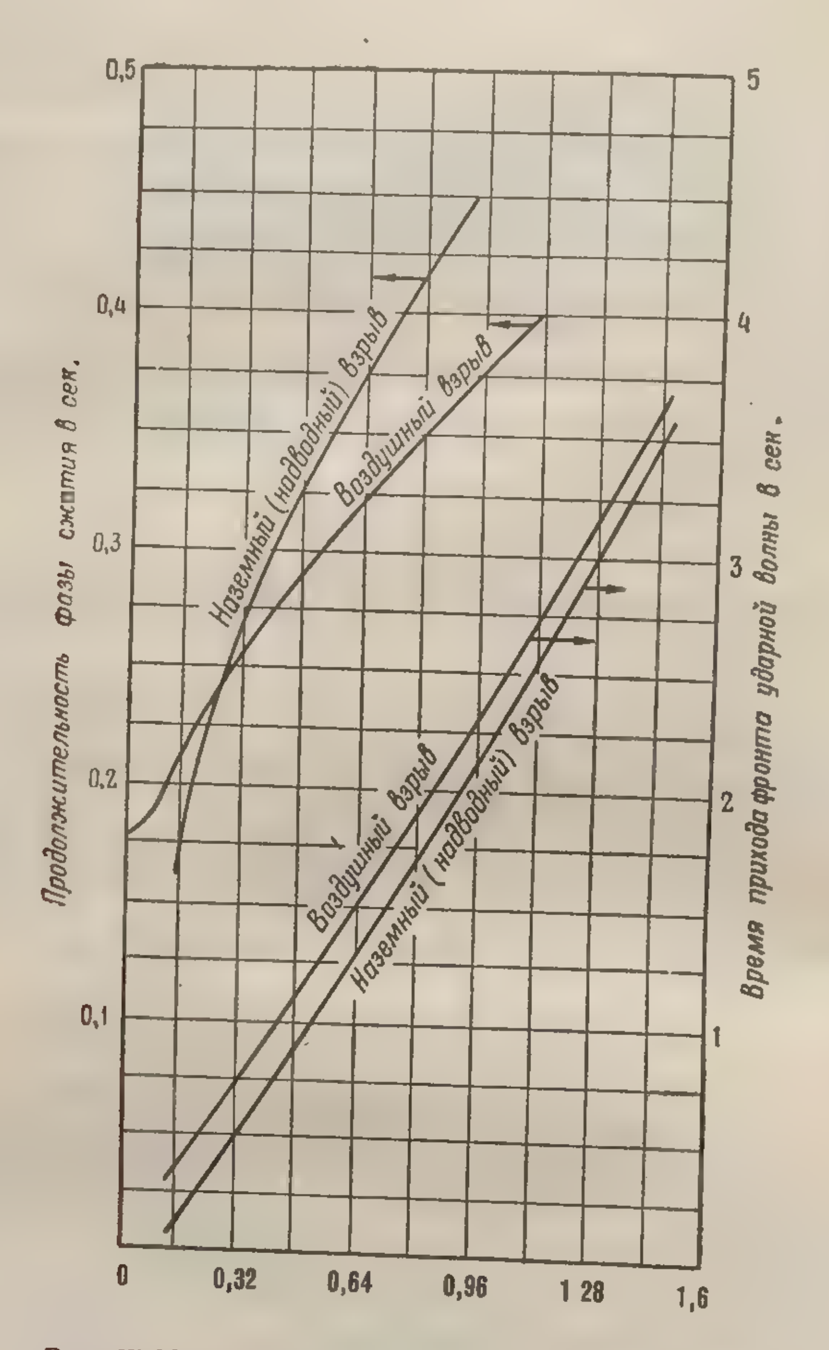


Рис. III.96. Время прихода фронта ударной волны и продолжительность фазы сжатия на поверхности земли при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

Кривые (рис. III.96) показывают зависимость времени прихода ударной волны в заданную точку и продолжительности фазы сжатия от расстояния до эпицентра (центра) для воздушного и наземного (надводного) взрывов бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* в условиях стандартной атмосферы при средних условиях на поверхности.

Для тротиловых эквивалентов, отличных от 1 тыс. *т*, продолжительность фазы сжатия и расстояние от эпицентра пропорциональны корню кубическому из мощности взрыва:

$$t = t_0 W^{1/3};\ d = d_0 W^{1/3},$$

где t_0 — время прихода волны в заданную точку или продолжительность фазы сжатия на расстоянии d_0 при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 тыс. *т*;

t — время прихода волны в заданную точку или продолжительность фазы сжатия при взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом W на расстоянии d.

Пример. Дано: бомба с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т* взорвана на поверхности.

Определить время прихода ударной волны в данную точку и продолжительность фазы сжатия на расстоянии 8,8 *км* от центра взрыва.

Решение: Из рис. III.93 находим, что корень кубический из 1000 равен 10. Тогда

$$d_0 = \frac{d}{W^{1/3}} = \frac{8{,}8}{10} = 0{,}88\ \textit{км}$$ (для взрыва с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*).

Из рис. III.96 определяем, что время прихода волны в заданную точку на расстоянии 0,88 *км* для наземного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* составляет 1,9 секунды, а длительность фазы сжатия — 0,44 секунды. Отсюда для наземного взрыва бомбы с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т* время прихода волны в заданную точку равняется

$$t = t_0 W^{1/3} = 1{,}9 \times 10 = 19 \text{ секунд},$$

продолжительность фазы сжатия

$$t = t_0 W^{1/3} = 0{,}44 \times 10 = 4{,}4 \text{ секунды}.$$

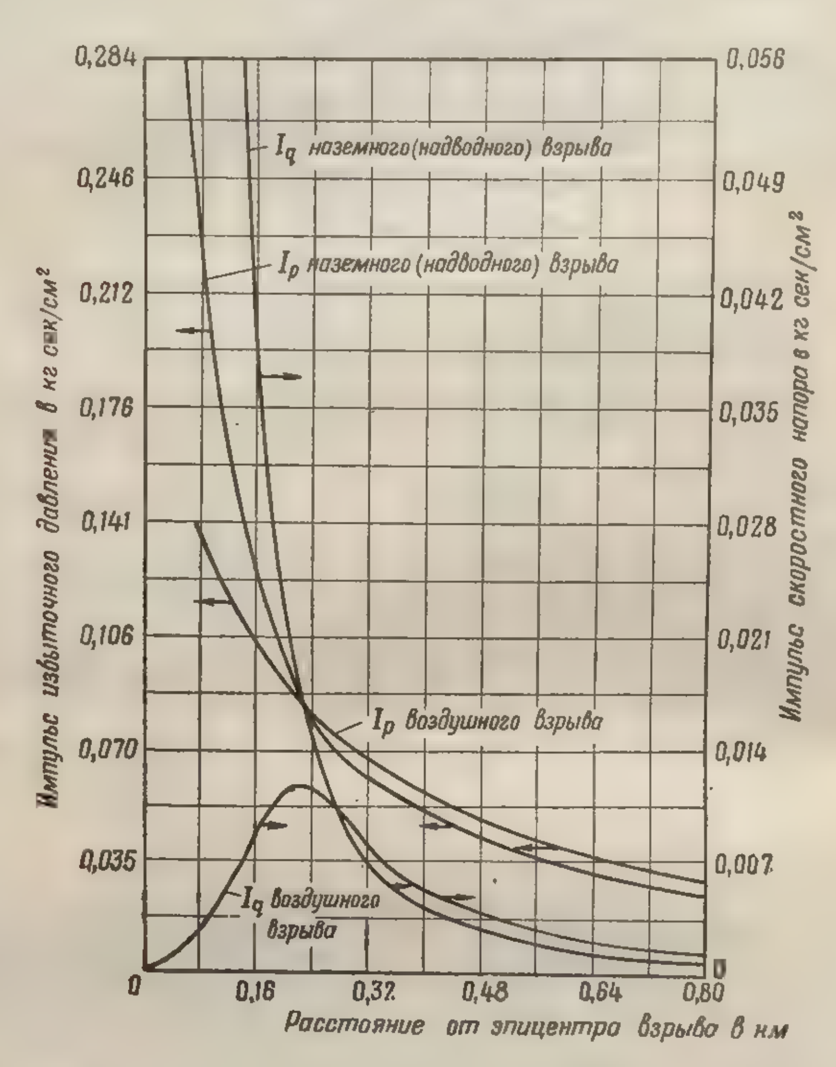


Рис. III.97. Импульсы избыточного давления и скоростного напора в фазе сжатия при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

Кривые (рис. III.97) показывают изменения импульсов избыточного давления и скоростного напора (горизонтальной составляющей) в зависимости от расстояния от эпицентра (центра) для воздушного и наземного (надводного) взрывов бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* в условиях стандартной атмосферы при средних условиях на поверхности.

Для тротиловых эквивалентов, отличных от 1 тыс. *т*, импульсы и расстояния могут быть определены из следующих выражений:

$$I = I_0 W^{1/3};\ d = d_0 W^{1/3},$$

где I_0 — импульс при взрыве мощностью 1 тыс. *т* на расстоянии d_0;
I — импульс при взрыве мощностью W тыс. *т* на расстоянии d.

Пример. Дано: произведен типичный воздушный взрыв бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*.

Определить расстояние, на котором импульс избыточного давления фазы сжатия равняется $0{,}4 \frac{кг \cdot сек}{см^2}$.

Решение: Из рис. III.93 находим, что корень кубический из 1000 равен 10.

$$I_0 = \frac{I}{W^{1/3}} = \frac{0{,}4}{10} = 0{,}04\ \frac{кг \cdot сек}{см^2}.$$

Из рис. III.97 определяем, что расстояние от эпицентра, на котором импульс избыточного давления фазы сжатия для типичного воздушного взрыва мощностью 1 тыс. *т* равен $0{,}04 \frac{кг \cdot сек}{см^2}$, составляет 0,64 *км*. Для типичного воздушного взрыва мощностью 1 млн. *т* это расстояние будет равно:

$$d = d_0 W^{1/3} = 0{,}64 \times 10 = 6{,}4\ км.$$

ГЛАВА IV

РАЗРУШЕНИЯ (ПОВРЕЖДЕНИЯ) СООРУЖЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ВОЗДУШНЫМ ВЗРЫВОМ

ВВЕДЕНИЕ

Общие сведения

IV.1. В предыдущей главе были рассмотрены общие закономерности воздушного взрыва и его воздействие на сооружения. В настоящей главе рассматриваются данные о характере разрушений различных типов коммунальных и промышленных сооружений, мостов и транспортных средств, вызываемых ядерным взрывом. Часть этих данных, особенно относящихся к повреждению крупных сооружений, была получена в результате обследований, произведенных в Хиросиме и Нагасаки. Как известно, над каждым из этих японских городов на высоте около 560 *м* были взорваны ядерные бомбы с тротиловым эквивалентом, равным приблизительно 20 тыс. *т*. За последнее время много дополнительных данных по этому вопросу было получено в результате ряда ядерных испытаний, проводившихся главным образом на полигоне в штате Невада в Соединенных Штатах. Настоящая глава носит в основном описательный характер; подробный анализ различных видов разрушений, вызываемых ядерными взрывами, дается в главе VI.

IV.2. Прежде чем перейти к подробному описанию поведения сооружений различных типов при ядерных взрывах, необходимо обратить внимание на важнейшее различие между взрывным эффектом ядерных и обычных фугасных бомб большого калибра. Сочетание высокой величины избыточного давления, распространяемого на большие расстояния, и длительности воздействия положительной фазы сжатия ударной волны, характерное для ядерных взрывов, приводит к массовому разрушению сооружений, подобно тому, как это наблюдается при землетрясениях. Обычный взрыв, как правило, повреждает лишь часть крупного сооружения; ударная волна ядерного взрыва воздействует на сооружения со всех сторон и разрушает их целиком.

IV.3. В результате обследования японских городов, подвергшихся атомной бомбардировке, было установлено, что небольшие

каменные здания, а также легкие сооружения и жилые дома в районе взрыва были полностью уничтожены воздействием ударной волны и последующими пожарами. У промышленных зданий были сорваны крыши и разрушены стеновые панели, исковерканы стальные каркасы. Почти все постройки, находившиеся в районе взрывов (за исключением некоторых железобетонных сооружений, в том числе заводских труб), были разрушены. Отдельные здания, как будто бы под напором ветра чудовищной силы, наклонились в сторону от эпицентра взрыва. Телефонные столбы были сломаны на уровне земли и отброшены в сторону вместе с проводами. Большие газгольдеры были разорваны и смяты ударной волной.

IV.4. Многие здания, казавшиеся издали уцелевшими, при осмотре оказались сильно поврежденными взрывом и опустошенными огнем. Пожары являются неизбежным следствием ядерных взрывов. В ряде случаев пожары вызываются непосредственным воздействием светового излучения ядерных взрывов. Большей частью, однако, пожары возникают вследствие опрокидывания и разрушения печей и топок и повреждения газовых магистралей. Значительные масштабы повреждений, вызываемых пожарами, связаны также с разрушением водопровода, что лишает возможности вести борьбу с пожарами.

IV.5. В результате действия ударной волны ядерного взрыва на различные сооружения образуется огромное количество летящих предметов: кирпичей, кусков дерева, стекла, металла и т. п.



Рис. IV.5. Разрушения, вызванные атомным взрывом в Хиросима

Эти предметы наносят дополнительные повреждения сооружениям и поражения людям. Колоссальное количество обломков, образующихся при взрыве, загромождает улицы, сильно затрудняя проведение спасательных и противопожарных работ (рис. IV.5.).

IV.6. Следует отметить, что многие сооружения в Японии по своей конструкции являются антисейсмическими; эти сооружения, по-видимому, более прочны, чем аналогичные постройки в США. С другой стороны, некоторые японские постройки являются, несомненно, менее прочными, чем в США. Тем не менее, вопреки распространенному мнению о крайней непрочности японских жилых домов, группа архитекторов и инженеров, обследовавших разрушения, произведенные ядерными взрывами в Японии, пришла к заключению, что устойчивость к взрыву американских жилых домов не будет заметно отличаться от устойчивости зданий в Хиросима и Нагасаки. Это заключение было подтверждено впоследствии данными, полученными в результате ядерных испытаний, проведенных в штате Невада в 1953 и 1955 гг.

IV.7. В последующих разделах этой главы дается описание разрушений трех групп сооружений: 1) жилых, промышленных, торговых и административных зданий и мостов; 2) транспортных сооружений, автомобилей и других транспортных средств (железнодорожного подвижного состава, самолетов, судов и т. д.); 3) коммунальных предприятий и сооружений, включая энергосистемы, системы подачи газа и воды и оборудование связи.

ЗДАНИЯ И ИХ ОБОРУДОВАНИЕ

Жилые здания

IV.8. В японских городах, подвергшихся воздействию ядерных взрывов, имелось много жилых домов с деревянным каркасом и стенами из необожженного кирпича. Значительная часть этих построек была уничтожена пожарами, вследствие чего удалось собрать очень скудный материал о повреждениях, которые эти постройки получили непосредственно от воздействия ударной волны. Можно полагать, что качество работы при возведении каркасов этих домов было хорошим, но часто не соблюдались необходимые инженерные принципы. Поэтому такие дома, как правило, являлись недостаточно прочными и в целом плохо противостояли воздействию взрыва. Слабым местом в конструкции японских жилых каркасных зданий являются соединения в шип и вообще все соединения каркаса. Брусья каркаса часто ослаблялись врубками больше, чем это было необходимо; в ряде случаев места для соединений выбирались неудачно, что ослабляло всю конструкцию в целом (рис. IV.8).



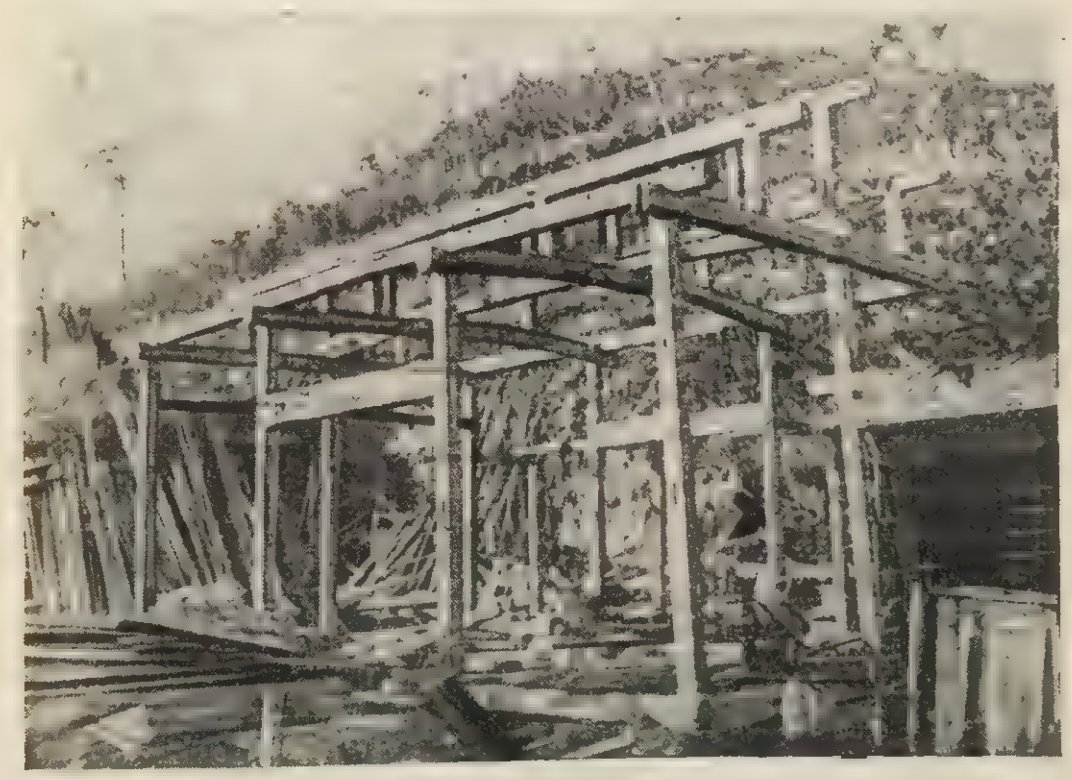


Рис. IV.8. Верхний фотоснимок — разрушение дома с деревянным каркасом в Хиросима (1,6 *км* от эпицентра взрыва); нижний фотоснимок — каркас жилого дома, конструкция которого свидетельствует о его небольшой прочности

IV.9. В Нагасаки жилые дома были полностью разрушены на расстоянии 2300 *м* от эпицентра взрыва, где предполагаемая величина избыточного давления составляла около 0,21 *кг/см²*. Средние разрушения наблюдались на расстоянии до 2600 *м*. На расстоянии около 2750 *м*, где избыточное давление составляло около 0,14 *кг/см²*, наблюдалось только повреждение крыш, стеновых панелей и внутренних перегородок зданий. Для восстановления этих зданий требовался средний ремонт.

IV.10. Большое количество данных о действии ударной волны на жилые дома различных типов было получено в результате испытаний, проведенных на полигоне в штате Невада в 1953 г. и в особенности в 1955 г. Во время испытания 17 марта 1953 г. было взорвано ядерное устройство, установленное на башне высотой 90 *м*; энергия взрыва была эквивалентна примерно 15 тыс. *т* тротила. При другом испытании, произведенном в мае 1955 г. на башне высотой 150 *м*, было взорвано ядерное устройство с тротиловым эквивалентом, равным приблизительно 30 тыс. *т*.

При каждом из этих взрывов производилось измерение избыточного давления воздуха, что позволяло в необходимых случаях устанавливать соотношение между разрушениями, произведенными ударной волной в целом и действием только максимального избыточного давления.

IV.11. Основная цель опытов, производившихся с жилыми постройками, заключалась в следующем: 1) выявить элементы конструкций зданий, наиболее подверженные разрушению при действии ударной волны, и разработать методы усиления этих конструкций; 2) получить данные о степени разрушения жилых домов при ядерных взрывах и оценить возможность приведения их в годное для жилья состояние без капитального ремонта; 3) определить эффективные способы защиты людей, находящихся в домах во время ядерного нападения, от действия ударной волны и излучений. Здесь будут рассмотрены только первые два вопроса, поскольку данная глава посвящена главным образом описанию действия ударной волны. Проблемы защиты будут изложены в гл. XII.

Двухэтажный дом с деревянным каркасом

(Испытания 1953 г.)

IV.12. При ядерном взрыве в 1953 г. были испытаны два примерно одинаковых дома распространенного в США типа, расположенные на различных расстояниях от места взрыва. Это были типовые двухэтажные дома с деревянным каркасом, имеющие подвал и кирпичный дымоход (рис. IV.12). Внутренние поверхно-

сти стен были оштукатурены, но не окрашены. Поскольку целью испытаний являлось изучение действия ударной волны, были приняты меры для предохранения этих домов от пожара. Для отражения светового излучения дома снаружи были окрашены в белый цвет, а окна, выходящие в сторону взрыва, были снабжены



Рис. IV.12. Деревянный каркасный дом, построенный для испытаний (полигон в штате Невада)

металлическими жалюзи, покрашенными алюминиевой краской. Оба дома были покрыты светло-серой черепицей. Дом, расположенный ближе к месту взрыва, вероятность воспламенения которого была больше, имел крышу из асбестовой черепицы, а расположенный дальше — из асфальтовой. Ни в том, ни в другом доме не было какого-либо оборудования, предназначенного для снабжения их электричеством, водой и газом.

IV.13. Один из этих двух домов был расположен в зоне действия головной ударной волны (в области отражения Маха), где избыточное давление (в падающей волне) составляло около 0,35 *кг/см*². На основе данных, полученных в Японии, можно было предположить, что этот дом будет полностью разрушен (что и произошло в действительности), но в данном случае задача

состояла в том, чтобы установить, может ли служить убежищем подвал этого дома.

Максимальное избыточное давление в падающей ударной волне в том месте, где находился второй дом, расположенный дальше от места взрыва, составляло 0,12 *кг/см²*. Предполагалось, что этот дом будет разрушен только частично, что позволит собрать данные, необходимые для разработки более прочных конструкций.



Рис. IV.14. Разрушение деревянного каркасного дома, вызванное ядерным взрывом (избыточное давление 0,35 *кг/см²*)

IV.14. Характер разрушения дома, расположенного ближе к месту взрыва, показан на рис. IV.14. Из фотоснимка видно, что отремонтировать этот дом невозможно. Первый и второй этажи этого дома были разрушены полностью. Крыша дома была сорвана, и отдельные части ее были разбросаны впереди дома и позади него. Торцовые стены дома были разрушены и отброшены в сторону, а кирпичный дымоход был разломан на несколько частей.

IV.15. Стены подвала этого дома несколько пострадали только выше уровня земли, главным образом с задней, более удаленной от места взрыва стороны. Передняя стена подвала была вдавлена внутрь с образованием трещин в местах ее примыкания к торцовым стенам. Балки надподвального перекрытия прогнулись (вероятно, вследствие разницы давления воздуха на первом этаже

и в закрытом по существу подвале), а трубчатые стойки отклонились назад. Однако в целом перекрытие между первым этажом и подвалом сохранилось довольно хорошо; только в нескольких местах образовались небольшие проломы. Большая часть подвала была свободна от обломков, и оборудованное в нем убежище не пострадало.



Рис. IV.16. Деревянный каркасный дом после ядерного взрыва (избыточное давление 0,12 *кг/см²*)

IV.16. Второй дом, подвергшийся воздействию максимального избыточного давления, равного 0,12 *кг/см²*, был сильно поврежден и снаружи и внутри, но устоял (рис. IV.16). Полный его ремонт обошелся бы очень дорого, но следует считать, что в случае крайней необходимости можно было бы ограничиться частичным ремонтом — восстановлением окон и дверей и усилением перекрытия над подвалом.

IV.17. Наиболее сильно пострадали двери и окна этого дома, включая оконные переплеты и рамы. Парадная дверь была разбита совершенно, а двери кухни и подвала сорваны с петель. Внутренние двери пострадали по-разному. Меньше всего пострадали те, которые перед взрывом были оставлены открытыми. Оконные стекла были выбиты во всем доме, в передней части дома были сорваны оконные рамы.

IV.18. На первом этаже этого дома наиболее сильное повреждение получили балки надподвального перекрытия. Бо́льшая часть этих балок, имевших поперечное сечение 5×20 *см* и расположенных на расстоянии 40 *см* друг от друга, оказалась сломанной. На большей части стоек передней стенки сечением 5×10 *см*, расположенных на расстоянии 40 *см* одна от другой, образовались трещины.

IV.19. Второй этаж пострадал меньше: были разбиты окна и потрескалась штукатурка. Повреждения крыши состояли главным образом в поломке стропил (сечением 10×15 *см*, расположенных на расстоянии 40 *см* одно от другого). Со стороны фасада были повреждены почти все стропила, с задней стороны сильных повреждений не оказалось. Крыша (длина ската которой от передней стенки до конька составляла 4,6 *м*) несколько прогнулась вдоль конька.

IV.20. Подвал дома совершенно не пострадал, если не считать повреждений окон и входной двери. Убежище, оборудованное в подвале, не пострадало.

Двухэтажный дом с деревянным каркасом

(Испытания 1955 г.)

IV.21. Учитывая описанные выше результаты, для испытаний, проводившихся в 1955 г., построили два однотипных деревянных каркасных дома, в конструкцию которых были внесены изменения, обеспечивавшие их усиление. Эти изменения, увеличившие стоимость постройки домов приблизительно на 10%, сводились к следующему: 1) была улучшена связь между наружными стенами и фундаментом; 2) трубчатые стойки в подвале были заменены поперечными железобетонными перегородками; 3) было увеличено сечение балок надподвального перекрытия; 4) дранка и штукатурка были заменены фанерой; 5) было увеличено сечение стропил и стеновых стоек (до 5×20 *см*); 6) было улучшено крепление оконных рам в оконных проемах (забивкой большего количества гвоздей).

IV.22. Даже при наличии этих улучшений предполагалось, что при максимальном избыточном давлении, равном 0,35 *кг/см²*, дом будет полностью разрушен. Поэтому один из домов был построен на таком удалении от места взрыва, где избыточное давление должно было составить 0,28 *кг/см²*. Благодаря повышенной прочности, а также отчасти благодаря пониженному давлению ударной волны этот дом не обрушился (рис. IV.22). Однако оба основных этажа дома оказались настолько поврежденными, что даже минимальный его ремонт был экономически нецелесообразен.

IV.23. Передняя половина крыши этого дома была разрушена, каркас крыши обрушился на прогоны чердачного перекрытия. Задняя половина крыши была сорвана и отброшена примерно на 8 *м* от дома. На большей части стропил, несмотря на их увеличенное сечение, образовались продольные трещины.

IV.24. В балках надподвального перекрытия образовались изломы и продольные трещины. Перекрытие удерживалось от обру-



Рис. IV.22. Деревянный каркасный дом усиленной конструкции после ядерного взрыва (избыточное давление 0,28 *кг/см²*)

шения половым настилом, который не получил существенных повреждений (рис. IV.24). Второй этаж и междуэтажное перекрытие мало пострадали, что свидетельствует о быстром выравнивании давления под перекрытием и над ним. Это произошло благодаря тому, что почти все двери и окна в доме были выбиты взрывом. Верхняя часть дымохода обвалилась, а нижняя часть хотя и устояла, но имела трещины в нескольких местах.

IV.25. Второй двухэтажный дом с каркасом усиленной конструкции был построен на таком удалении от места взрыва, где максимальное избыточное давление составило около 0,18 *кг/см²*, т. е. было значительно больше избыточного давления, при котором производились испытания второго дома в 1953 г. Вследствие этого дом получил более серьезные повреждения, однако состояние его после взрыва было таково, что при крайней необходимости его можно было использовать для жилья, произведя не слишком



Рис. IV.24. Разрушение балок надподвального перекрытия деревянного каркасного дома усиленной конструкции в результате ядерного взрыва (избыточное давление 0,28 *кг/см²*)



Рис. IV.25. Деревянный каркасный дом усиленной конструкции после ядерного взрыва (избыточное давление 0,18 *кг/см²*)

дорогой ремонт (рис. IV.25). Этот дом получил примерно такие же по объему повреждения, какие наблюдались в аналогичных домах до усиления их конструкции при избыточном давлении 0,12 *кг/см²*.

IV.26. Помимо окон и дверей, от взрыва серьезно пострадали каркас дома и особенно стропила крыши. Со стороны, обращенной к месту взрыва, была оторвана карнизная доска, и можно



Рис. IV.27. Повреждения балок надподвального перекрытия дома с деревянным каркасом усиленной конструкции, вызванные ядерным взрывом (избыточное давление 0,18 *кг/см²*)

предполагать, что при несколько более высоком давлении ударной волны со здания была бы сорвана вся крыша. Коньковый брус был сломан, а некоторые из стропил расщеплены. Часть чердачного перекрытия приподнялась на несколько дюймов; была выбита одна из центральных балок чердачного перекрытия и сорвана часть фанерной обшивки потолка. Однако сами балки чердачного перекрытия пострадали относительно мало.

IV.27. Междуэтажное перекрытие и стены первого этажа пострадали незначительно. На балках надподвального перекрытия образовались трещины и изломы, но так как накат уцелел, в подвал не попало никаких обломков (рис. IV.27).

IV.28. Оконные рамы в передней и боковых стенах дома были

сломаны и сорваны, с задней стороны дома они пострадали меньше. Наружные двери были сорваны и отброшены внутрь, некоторые из внутренних дверей были также сорваны с петель. Кирпичный дымоход не обрушился, но в нем в двух местах образовались трещины.

Двухэтажный кирпичный дом с несущими стенами

IV.29. Для сравнения результатов опытов, произведенных в 1953 г. с двухэтажными деревянными каркасными домами, в 1955 г. были испытаны два аналогичных по размерам и планировке кирпичных дома с несущими стенами (рис. IV.29). Один из домов был подвергнут воздействию избыточного давления 0,35 *кг/см²*, другой — 0,12 *кг/см²*. Наружные стены и фундамент были выложены из шлакоблоков; стены, кроме того, имели кирпичную облицовку. Перекрытия, внутренние перегородки и несущая часть крыши были изготовлены из дерева.

IV.30. Кирпичный дом, подвергшийся воздействию избыточного давления 0,35 *кг/см²*, был совершенно разрушен (рис. IV.30). При обрушении наружных стен обломки в основном падали вне пределов дома, благодаря чему на перекрытия попало незначительное



Рис. IV.29. Кирпичный дом перед ядерным взрывом (полигон в штате Невада)

количество этих обломков. Крыша была разрушена и сорвана, причем задняя ее часть упала в 15 *м* за домом. Обломки первого этажа частично упали в подвал через пролом, образовавшийся в центральной части надподвального перекрытия. Этот пролом образовался в результате суммарного действия ударной волны и падающих обломков. Дымоход дома был разбит на несколько крупных частей.



Рис. IV.30. Разрушение кирпичного дома в результате ядерного взрыва (избыточное давление 0,35 *кг/см²*)

IV.31. Такой же дом, подвергшийся действию избыточного давления 0,12 *кг/см²*, оказался сильно поврежденным. Однако состояние дома позволяло его использовать для заселения после небольшого ремонта (рис. IV.31).

IV.32. Наружные стены дома не имели каких-либо признаков повреждения, но крыша и чердачное перекрытие были серьезно повреждены. Связь между задними стропилами и коньковым брусом оказалась нарушенной, и стропила опустились на несколько дюймов. Коньковый брус был надломлен в средней своей части; несколько брусьев обрешетки (5×10 *см*) были также сломаны. Балки чердачного перекрытия в задней части дома раскололись посредине, штукатурка потолка осыпалась. Междуэтажное перекрытие пострадало мало. Отдельные балки надподвального пере-



Рис. IV.31. Кирпичный дом после ядерного взрыва (избыточное давление 0,12 *кг/см²*)

крытия этажа были расщеплены. Штукатурка внутренних поверхностей дома была сильно повреждена.

IV.33. В окнах со стороны фасада и в торцовых стенах дома были выбиты стекла; с задней стороны дома стекла пострадали значительно меньше. Наружные двери были разбиты, часть внутренних дверей и двери шкафов были сорваны с петель.

Одноэтажный сборный дом с деревянным каркасом

IV.34. На бетонных фундаментных плитах, уложенных на уровне с землей, было построено два одноэтажных сборных дома с деревянным каркасом. Это были дома обычной конструкции, за исключением того, что в каждом из них имелось наземное убежище; убежищем являлась ванная комната с железобетонными стенами, полом и потолком и с защитной дверью или ставней (рис. IV.34).

IV.35. Дом, подвергшийся воздействию избыточного давления (в падающей волне) 0,35 *кг/см²*, был полностью разрушен. Однако убежище-ванная совсем не пострадало. Несмотря на то, что задвижка на защитной ставне была сорвана и ставня оказалась незакрепленной, окно не было повреждено. Крыша была сорвана,



Рис. IV.34. Деревянный сборно-разборный дом перед ядерным взрывом (полигон в штате Невада); справа видна защитная дверь (на месте окна ванной комнаты)



Рис. IV.35. Деревянный сборно-разборный дом после ядерного взрыва (избыточное давление 0,35 *кг/см²*)

стропила расщеплены и сломаны. Торцовые стены были отброшены наружу. Часть передней стены не обрушилась, но наклонилась в сторону от эпицентра взрыва (рис. IV.35).

IV.36. Второй дом того же типа, подвергшийся воздействию максимального избыточного давления 0,12 *кг/см*², получил средние повреждения и легко мог быть отремонтирован. Окна этого дома были разбиты, двери сорваны с петель, и сильно повреждена сухая штукатурка внутренних поверхностей. Основные повреждения каркаса заключались в поломке конькового бруса и в перекосе всего каркаса. Крыша над террасой дома была приподнята на 15 *см*.

Одноэтажный дом из бетонных панелей

IV.37. В 1955 г. был испытан также жилой дом, собранный из легких железобетонных стеновых панелей и перегородок, соединенных посредством сварки концов арматуры (рис. IV.37.). Железобетонные панели крыши прикреплялись к стенам при помощи специальных связей. Стены дома опирались на бетонные столбы и бетонную фундаментную плиту, бетонирование которой производилось после возведения стен. Прочная связь между фундаментной плитой и стенами обеспечивалась при помощи уложенных по периметру этой плиты металлических стержней и болтов, которые вместо головок имели крюки; этими крючками болты зацеплялись за стержни, другими концами они ввертывались во вкладыши сте-



Рис. IV.37. Дом из железобетонных панелей до ядерного взрыва (полигон в штате Невада)

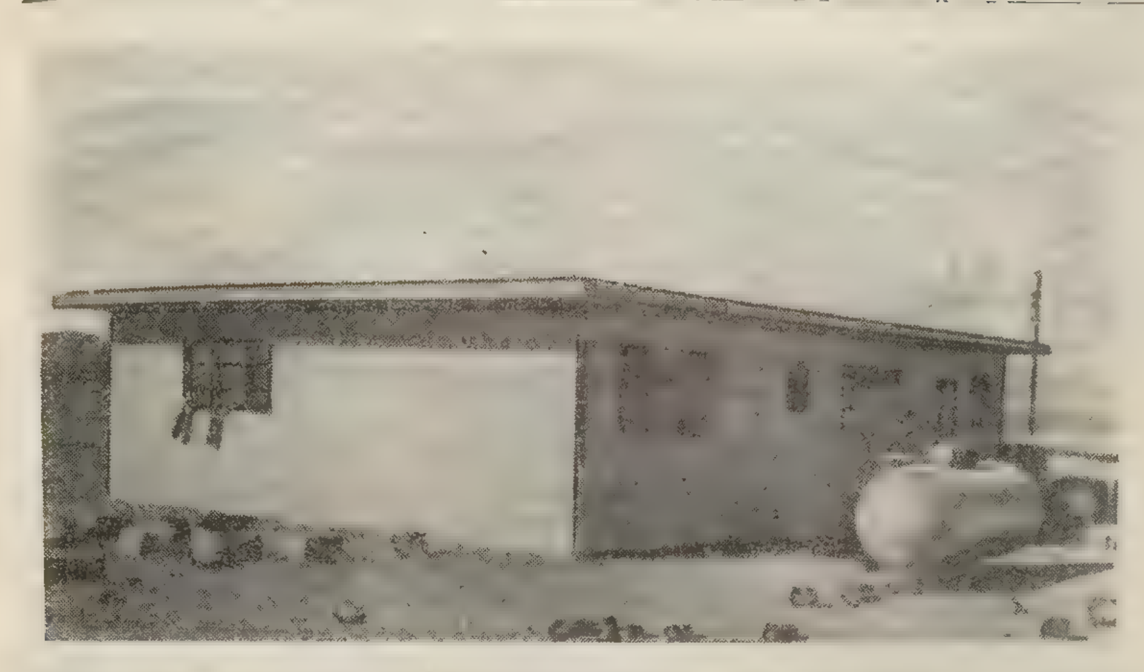


Рис. IV.38. Дом из железобетонных панелей после ядерного взрыва (избыточное давление 0,35 *кг/см²*). Резервуар со сжиженным нефтяным газом стоявший у дома, существенных повреждений не получил

новых панелей. В целом по своей конструкции этот дом удовлетворял требованиям сейсмической устойчивости.

IV.38. Этот дом хорошо выдержал максимальное избыточное давление 0,35 *кг/см²*, и после замены разбитых и сильно поврежденных дверей и окон его можно было бы использовать для жилья (рис. IV.38).

IV.39. Железобетонные плиты крыши со стороны фасада несколько приподнялись над стенами, однако связь их со стенами не была нарушена. В стенах образовались небольшие трещины, и в некоторых местах произошло незначительное смещение стен, в отдельных местах обнажились соединения стеновых панелей. Несколько погнулись стальные переплеты окон.

IV.40. Как и следовало ожидать, такой же дом, подвергшийся воздействию ударной волны с максимальным избыточным давлением, равным 0,12 *кг/см²*, пострадал еще меньше. Но в этом доме были выбиты почти все стекла, сорваны с петель и разбиты наружные двери и погнуты оконные переплеты. Наиболее существенным повреждением явилось выкрашивание бетона в местах соединений стеновых панелей.

Одноэтажный дом из армированных бетонных блоков

IV.41. Этот тип дома (рис. IV.41), также испытывавшийся в 1955 г., имел, как и предыдущий, сейсмически устойчивую конструкцию. Пол дома представлял собой бетонную плиту, бетони-

рование которой было произведено на уровне поверхности земли. Наружные и внутренние стены его были выложены из легких бетонных блоков. Стеновые блоки армировались вертикальными и горизонтальными стальными стержнями, проходившими через блоки на двух уровнях. Нижние концы вертикальных стержней заанкеривались в бетонной плите пола. Оконные и дверные проемы были перекрыты железобетонными перемычками. Крыша была собрана из легких бетонных плит.

IV.42. От действия ударной волны с максимальным избыточным давлением, равным 0,35 *кг/см²*, наиболее сильно пострадали окна и двери дома. Были выбиты стекла и сорваны с петель и разрушены двери. Стальные оконные переплеты погнулись, но почти все остались на своих местах. Основные элементы дома пострадали незначительно (рис. IV.42), и дом мог быть восстановлен при небольших затратах на ремонт.

IV.43. Бетонные плиты крыши дома слегка сдвинулись, но соединения их со стенами не нарушились. Кладка под большим окном была вдавлена внутрь на 10 *см*. Это объясняется, по-видимому, отсутствием крепления стен к полу под оконными проемами. Небольшие трещины в стене над тем же окном появились,



Рис. IV.41. Дом усиленной конструкции из бетонных блоков до ядерного взрыва (полигон в штате Невада)

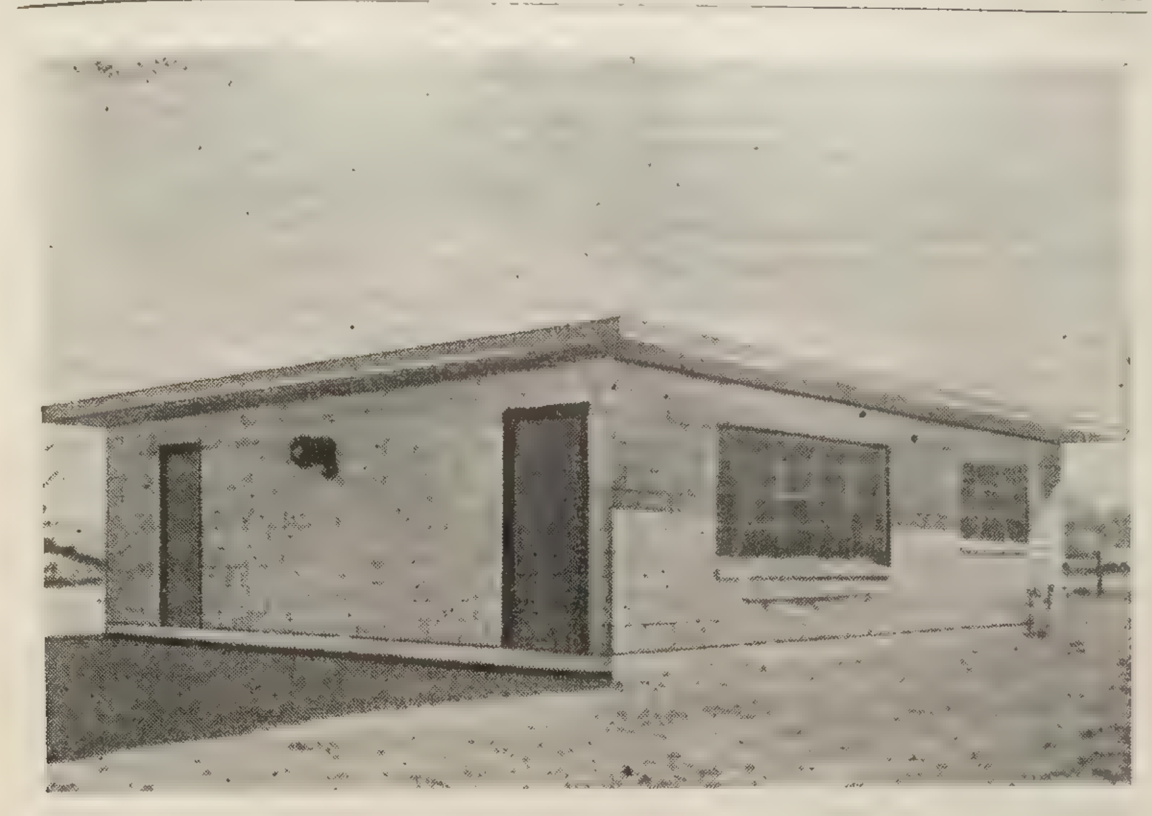


Рис. IV.42. Дом усиленной конструкции из бетонных блоков после ядерного взрыва (избыточное давление 0,35 *кг/см²*)

по-видимому, в результате неправильной установки железобетонной оконной перемычки.

IV.44. При максимальном избыточном давлении ударной волны, равном 0,12 *кг/см²*, повреждения, полученные домом такого же типа, заключались лишь в разрушении дверей и окон. Стальные оконные переплеты погнулись, но остались на своих местах. Наблюдалось также выкрашивание бетона в местах заделки оконных переплетов в стены. В целом дом получил мелкие повреждения и легко мог быть отремонтирован.

Передвижные домики на прицепах

IV.45. При проведении испытания в 1955 г. были подвергнуты воздействию ударной волны 16 домиков различных типов, смонтированных на прицепах. При испытании передвижные домики были установлены на значительном расстоянии от эпицентра атомного взрыва (с учетом того, что такие домики устанавливаются обычно на окраинах городов). Девять прицепов были расположены в зоне, которой соответствовало максимальное избыточное давление 0,12 *кг/см²*, а остальные семь прицепов подверглись воздействию максимального избыточного давления, равного 0,07 *кг/см²*.

При установке прицепы были различным образом ориентированы по отношению к направлению распространения ударной волны.

IV.46. Два передвижных домика из числа подвергшихся воздействию более высокого избыточного давления были опрокинуты силой взрыва. Один из этих домиков был установлен боковой стороной к направлению действия ударной волны, а второй, более легкий, примерно под углом в 45°. Все остальные домики-прицепы не были опрокинуты. Повреждения, полученные передвижными домиками, не имели серьезного характера. Для одной и той же величины избыточного давления различная степень повреждений домиков обусловливалась различием их конструкций, типов креплений, сечения металлических деталей, расположения стоек и величины окон.

IV.47. В результате действия ударной волны ядерного взрыва многие домики были несколько перекошены, а на их стенах и крышах образовались небольшие вмятины. Количество проломов было относительно невелико. В большей части домиков-прицепов были разбиты стекла; внутрь прицепов, окна которых имели шторы, битое стекло почти не попадало. При отсутствии штор и жалюзи, в особенности если окна имели большие размеры, стекло попадало внутрь домиков.

IV.48. Внутри домиков, как правило, повреждались панели, опрокидывалась и ломалась мебель. Печи и холодильники оставались на своих местах, полы не получали каких-либо повреждений. Ремонт этих передвижных домиков и их оборудования мог быть произведен при небольших затратах.

IV.49. В передвижных домиках, подвергшихся воздействию избыточного давления 0,07 *кг/см²*, было разбито несколько окон. Каких-либо серьезных повреждений эти домики не получили. Для приведения этих домиков в годное для жилья состояние требовалось произвести только ремонт окон.

Продовольствие

IV.50. Во время испытаний 1955 г. было изучено действие ядерного взрыва на 90 различных видов пищевых продуктов. Выбор видов продуктов определялся тем, какие из них являются наиболее распространенными в рационе американцев. Приблизительно половину из них составляли такие основные продукты питания, как мука и сахар, картофель, фрукты и обработанное мясо, а также свежее мясо и замороженные продукты. Другая половина состояла из консервированных продуктов, находившихся в металлических или стеклянных банках. Помимо этого, исследовалось действие взрыва на различные упаковочные материалы, применяемые в розничной и оптовой торговле, а также была проверена эффективность различных методов упаковки.

IV.51. Образцы пищевых продуктов, предназначенные для испытания, были размещены в зданиях, расположенных на расстоянии от 1,6 до 24 *км* от эпицентра взрыва. Наряду с определением характера воздействия ударной волны на эти продукты производилось изучение также действия на них ядерного излучения из зоны взрыва, остаточного ядерного излучения и радиоактивных осадков.

В данном разделе будет рассматриваться только действие ударной волны.

IV.52. Свежие продукты, такие, как, например, картофель, яблоки, лук, упакованные в обычные легкие деревянные ящики, в результате взрыва получили механические повреждения. Если не считать этого, то непосредственный ущерб, причиненный ударной волной, был относительно невелик. Металлические и стеклянные банки с консервированными продуктами почти не пострадали от воздействия избыточного давления, но некоторые из них были повреждены летящими осколками. Упакованные продукты повреждались в основном вследствие падения с кухонных полок, на которые их обычно укладывали. В случаях, когда металлические или стеклянные банки с консервированными продуктами хранились в подвалах, они повреждались весьма незначительно (даже тогда, когда дом подвергался сильному разрушению).

IV.53. Тара из мягких упаковочных материалов, таких, как бумага, полиэтилен и картон, получала сильные повреждения от летящих предметов. В пищевые продукты, находившиеся в этой таре, в некоторых случаях попадали осколки стекла. В тех случаях, когда продукты в такой упаковке были защищены от действия осколков, ударная волна не наносила практически каких-либо повреждений этой упаковке.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Японские данные

IV.54. В Нагасаки и Хиросима имелось много промышленных зданий со стальным каркасом, покрытых волнистой сталью или асбоцементом. Такой же материал употреблялся и для стенового заполнения. В некоторых из них были установлены мостовые краны обычно небольшой мощности. В целом по своей конструкции эти промышленные здания напоминали подобные сооружения, имеющиеся в США.

IV.55. Взрывом атомной бомбы этим сооружениям были нанесены серьезные повреждения на расстояниях до 18 *км* от эпицентра взрыва. Здания этого типа, находившиеся недалеко от эпицентра взрыва, были полностью разрушены. Стальные каркасы зданий, находившихся несколько дальше от эпицентра, под

воздействием ударной волны наклонились в сторону от взрыва (рис. IV.55а и б). Высокие и тонкие колонны, имевшиеся в этих зданиях, оказывали малое сопротивление горизонтально направленной нагрузке. В некоторых случаях эти колонны разрушились вследствие одновременного действия поперечной нагрузки, вызывавшей прогиб, и продольной нагрузки, возникавшей в результате воздействия ударной волны на крышу. Это вызывало резкий изгиб колонн и в некоторых случаях полное их разрушение.

Стропильные фермы в той части здания, которая была обращена в сторону взрыва, оказались изогнутыми благодаря действию горизонтальной составляющей нагрузки ударной волны.

IV.56. В действии ударной волны на металлический каркас здания наблюдалось заметное различие в зависимости от того, какой материал использовался для стенового заполнения и кровли. При действии ударной волны на асбоцемент последний легко разрушался и это обусловливало более быстрое уравновешивание давления внутри и снаружи здания, вследствие чего стальной каркас деформировался меньше, чем в тех случаях, когда материалом стенового заполнения и кровли была волнистая сталь.



Рис. IV.55а. Разрушение промышленного здания со стальным каркасом в Хиросима (0,56 *км* от эпицентра взрыва)

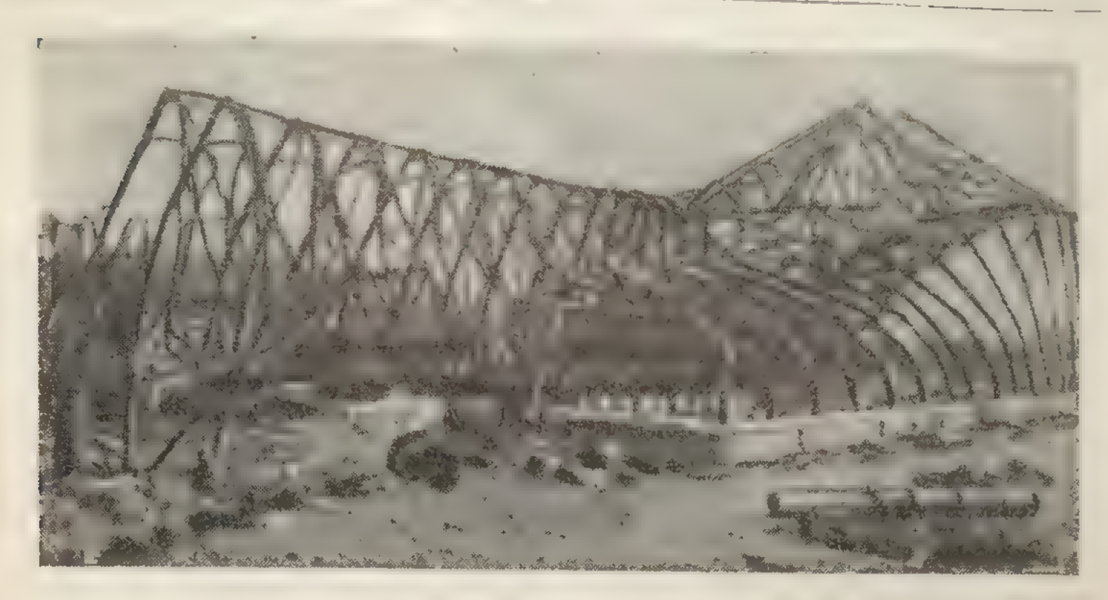


Рис. IV.55б. Разрушение одноэтажного здания с легким стальным каркасом в Хиросима (1,3 *км* от эпицентра взрыва); здание было частично разрушено взрывом; полное разрушение произошло в результате последующего пожара



Рис. IV.59. Разрушение станочного оборудования в здании со стальным каркасом в Хиросима (1 *км* от эпицентра взрыва)

IV.57. Незащищенные стальные конструкции имели повреждения не только от воздействия ударной волны, но также и от возникавших пожаров, что сильно затрудняло определение эффекта, вызванного только действием ударной волны. В целом стальные каркасы зданий в результате взрыва оказались настолько поврежденными, что даже при наличии достаточного количества материалов для ремонта эти здания нельзя было бы восстановить.

IV.58. Конструкция крыш некоторых промышленных сооружений включала в себя деревянные стропильные фермы. Ввиду недостаточной прочности таких ферм они легче подвергались разрушению под действием ударной волны и уничтожались, кроме того, огнем. В некоторых зданиях крыши имели стальные стропильные фермы, опиравшиеся на бетонные колонны. Такие колонны оказались более устойчивыми к взрыву, чем стальные.

IV.59. Повреждение станков, находившихся в промышленных зданиях, вызывалось падением обломков, образующихся при разрушении крыши и стен, а также в результате пожаров в зданиях с деревянным каркасом (рис. IV.59). В других случаях станки



Рис. IV.60а. Разрушенный промышленный район в Нагасаки; видны сохранившиеся дымовые трубы (0,8 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.60б. Разрушение круглой железобетонной трубы высотой 18 *м* в Хиросима (0,54 *км* от эпицентра взрыва). Под действием ударной волны разрушилась только верхняя часть трубы на высоте 4,5 *м* от основания

повреждались в результате их смещения с фундаментов, которое происходило вследствие разрушения зданий. Во многих случаях станки имели ременной привод, и в результате повреждения зданий эти станки оказались сорванными со своих фундаментов и опрокинутыми.

IV.60. Наиболее устойчивыми к действию ударной волны оказались дымовые трубы, в особенности железобетонные (рис. IV.60а). Благодаря своей форме они испытывают в основном только

нагрузку от скоростного напора; и если при этом они обладают также достаточной прочностью, то благодаря их большому периоду колебаний они оказываются менее чувствительными к действию ударной волны, чем многие другие сооружения. Сильное разрушение железобетонной дымовой трубы показано на рис. IV.60б.

Испытания в штате Невада в 1955 г.

IV.61. Во время испытаний в 1955 г. было произведено определение устойчивости к ядерному взрыву металлических построек трех стандартных типов, используемых для различных целей в промышленности и торговле. Эти постройки подверглись воздействию максимального избыточного давления 0,22 и 0,084 *кг/см*². Основная задача этих испытаний заключалась в том, чтобы определить, при каком максимальном давлении ударной волны эти сооружения уцелеют и смогут быть использованы после сравнительно небольшого ремонта. Наряду с этим ставилась задача выявить возможность усовершенствования конструкции этих построек, чтобы обеспечить бóльшую их устойчивость к воздействию ударной волны.

Постройка со стальным каркасом и алюминиевыми панелями

IV.62. Сооружение (используемое в промышленности) имело стальной каркас; для стенового заполнения и кровли использовались панели из листового алюминия (рис. IV.62а). При избыточном давлении, равном 0,22 *кг/см*², это сооружение получило сильные повреждения. Стальной каркас со сварными и болтовыми соединениями был сильно деформирован и сдвинут с бетонного фундамента. Со стороны, обращенной к месту взрыва, величина сдвига у карнизов достигала 0,3 *м* (рис. IV.62б).

IV.63. Со стороны сооружения, обращенной к месту взрыва, были сорваны панели из листового алюминия вместе с элементами каркаса. Отдельные панели и части каркаса были отброшены ударной волной внутрь сооружения и повредили оборудование, находившееся в нем. На задних и торцовых стенках сооружения большая часть алюминиевых панелей не была сорвана с каркаса; алюминиевые панели сохранились также и на заднем скате крыши, однако соединения этих панелей были нарушены.

IV.64. Под воздействием максимального избыточного давления 0,084 *кг/см*² стальной каркас сооружения такого же типа получил лишь незначительные повреждения. Алюминиевые стеновые панели и крыша не были сорваны, но на стене, обращенной к взрыву, произошло нарушение болтовых соединений. Стеновые панели, а также панели крыши, обращенные к месту взрыва, прогнулись



Рис. IV.62а. Внешний вид постройки с жестким стальным каркасом перед ядерным взрывом (полигон в штате Невада)



Рис. IV.62б. Внешний вид постройки с жестким стальным каркасом после ядерного взрыва (избыточное давление 0,22 *кг/см²*)

внутрь. Центральные стропильные фермы в передней части сооружения были оторваны от стоек. Алюминиевые панели торцовых стен также слегка прогнулись; на задней стенке и противоположном скате крыши панели не получили существенных повреждений.

IV.65. Конструкция описанных выше построек обеспечивает достаточную их устойчивость и возможность восстановления при условии, если избыточное давление ударной волны взрыва не превышает 0,07 *кг/см²*. Усиление конструкции каркаса этих построек может обеспечить повышенную их устойчивость к действию ударной волны. Усиление связи между фундаментом и стенами и повышение сопротивляемости действию горизонтальной нагрузки также даст положительный результат.

Бескаркасная постройка со стальными панелями

IV.66. Второй тип стандартной постройки (используемой в промышленности), подвергшийся испытанию, представлял собою бескаркасное сооружение, стены и крыша которого были собраны из легких стальных панелей шириной 41 *см* со швеллерным



Рис. IV.66а. Внешний вид бескаркасной постройки из стальных панелей до ядерного взрыва (полигон в штате Невада)

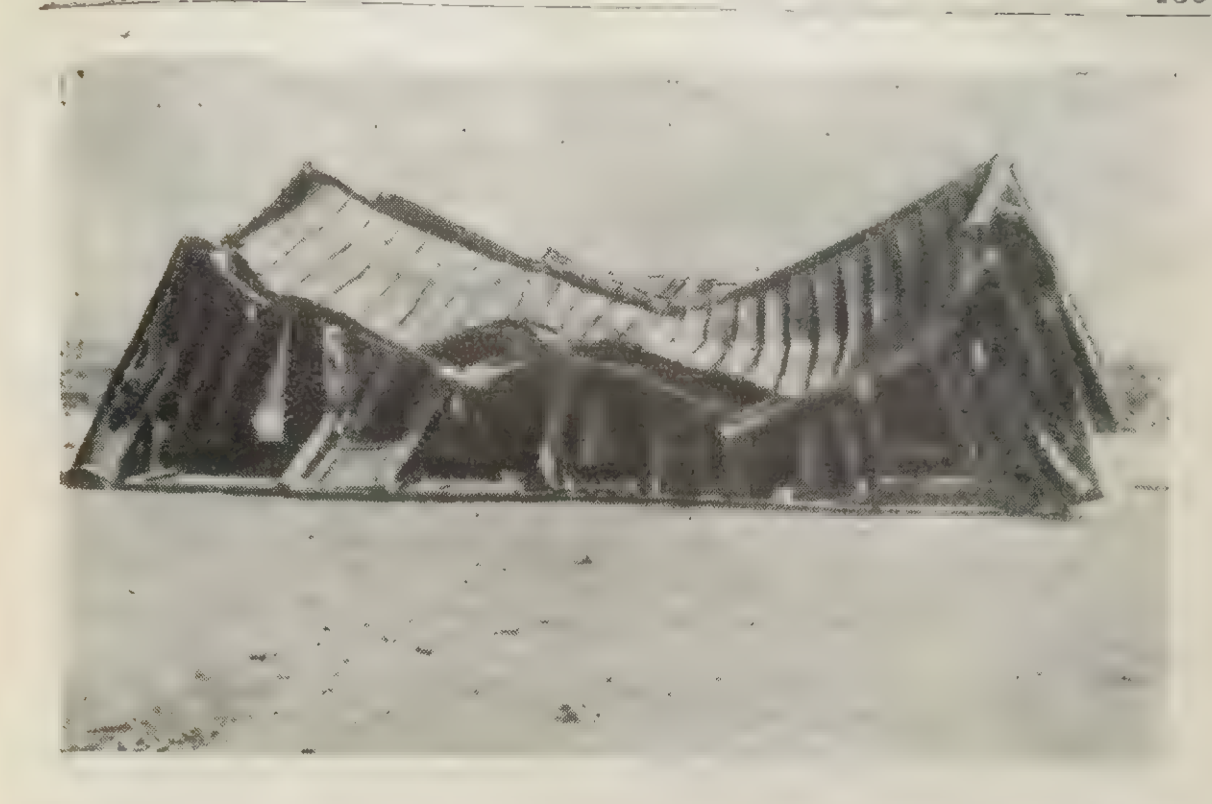


Рис. IV.66б. Разрушение бескаркасной постройки из стальных панелей в результате ядерного взрыва (избыточное давление 0,22 *кг/см²*)

сечением (рис. IV.66а). При избыточном давлении, равном 0,22 *кг/см²*, эта постройка была полностью разрушена (рис. IV.66б). Несколько стеновых панелей было оторвано и отброшено на 15 *м*, но сильно деформированные элементы постройки остались в основном на своих местах; сохранилась также связь большей части секций задней и торцовых стен с фундаментом. Крыша здания обрушилась на находившееся внутри оборудование.

IV.67. При максимальном избыточном давлении, равном 0,084 *кг/см²*, постройка этого типа оказалась значительно устойчивее, однако отдельные ее части получили довольно значительные повреждения. Величина прогиба передних стеновых панелей в центре составила 0,3—0,6 *м*. Задняя стена, а также задний скат крыши оказались неповрежденными; в центральной части крыши образовался небольшой прогиб.

IV.68. Испытания показали, что бескаркасные постройки со стальными панелями практически могут быть восстановлены, если они подвергались воздействию ударной волны с максимальным избыточным давлением, не превышающим 0,05—0,07 *кг/см²*. Эти постройки отличаются простотой сборки, но они обладают слабой устойчивостью к действию ударной волны Повышение устойчивости этих построек при одновременном сохранении простоты конструкции представляется трудной задачей.

Бескаркасное здание с панелями из волнистой стали

IV.69. Третий тип постройки (используемой в промышленности), подвергшейся испытанию, представлял собой бескаркасное сооружение, собранное из стальных волнистых панелей шириной 108 *см* (рис. IV.69). Соединение смежных панелей, а также стеновых панелей с бетонным фундаментом производилось при помощи болтов.

IV.70. В результате воздействия максимального избыточного давления 0,22 *кг/см²* сооружение этого типа получило довольно сильное повреждение, однако соединения между его элементами не были нарушены и сооружение еще могло быть использовано в качестве легкого укрытия. На переднем скате крыши образовался прогиб величиной 0,3—0,6 *м*; конек крыши также несколько прогнулся. На заднем скате крыши повреждений почти не было (рис. IV.70).

IV.71. На передней и торцовых стенах образовались значительные вмятины, входная дверь была сорвана с петель. Все окна в доме получили повреждения различной степени. В окнах задней стены сохранилось несколько стекол.

IV.72. Другая постройка этого типа, подвергшаяся воздействию избыточного давления 0,08 *кг/см²*, получила незначительные

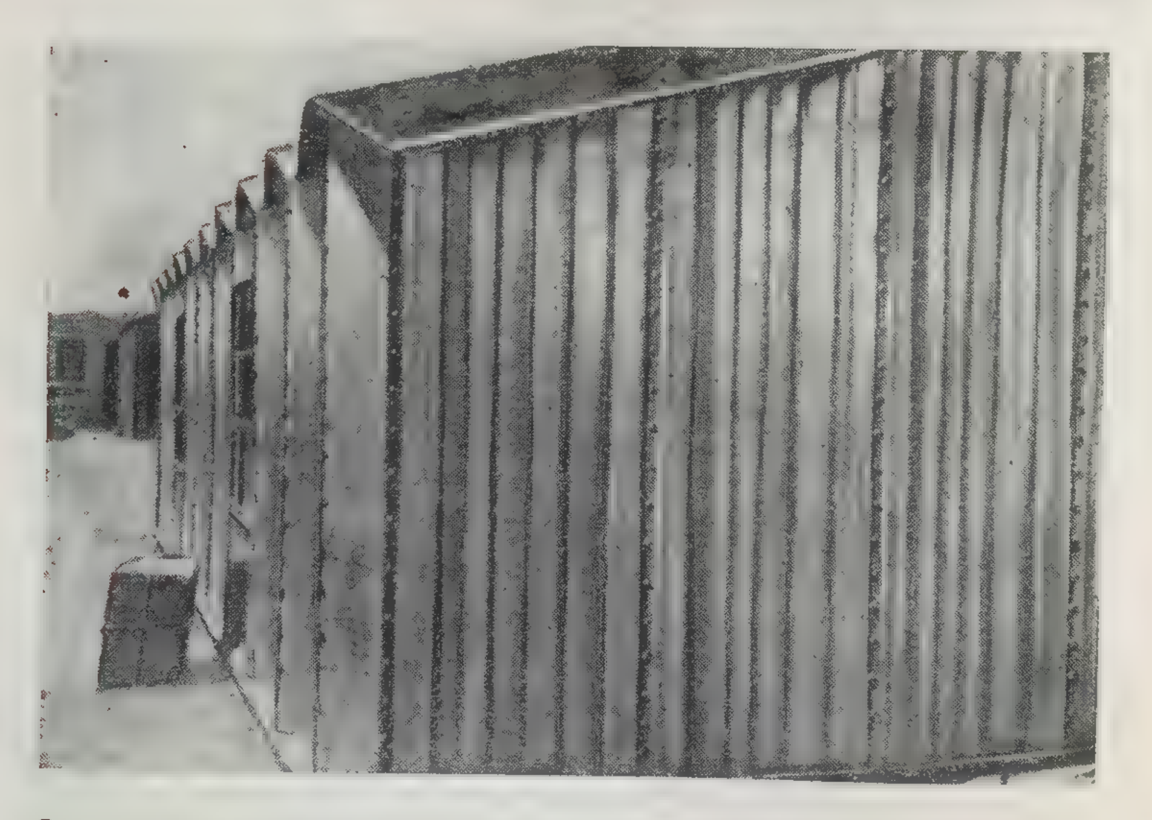


Рис. IV.69. Бескаркасная постройка из волнистой стали до ядерного взрыва (полигон в штате Невада)



Рис. IV.70. Повреждение бескаркасной постройки из волнистой стали, вызванное ядерным взрывом (избыточное давление 0,22 *кг/см²*)

повреждения. В некоторых местах прогнулся только конек крыши на 2,5—5 *см*, но ни сама крыша, ни стены здания заметно не деформировались. Большая часть стекол в окнах была выбита. Для устранения полученных повреждений требовался незначительный ремонт.

IV.73. Из всех типов испытанных сооружений наиболее устойчивой к действию ударной волны ядерного взрыва оказалась бескаркасная постройка из волнистой стали. Следует считать, что если избыточное давление ударной волны ядерного взрыва не будет превышать 0,2 *кг/см²*, то данный тип постройки не получит сильных повреждений и его использование будет возможно после относительно небольшого ремонта. Целесообразно, однако, в этой постройке усовершенствовать конструкцию дверей и окон с целью уменьшения возможных поражений от летящих осколков оконного стекла.

Резервуары для хранения жидкого топлива

IV.74. В районе разрушенных японских городов, а также на полигоне в штате Невада крупных резервуаров для хранения нефти и горючего (емкостью порядка 8000 $м^3$) не было. Об устойчивости подобных сооружений можно судить по результатам катастрофы, происшедшей в Техас-Сити в апреле 1947 г. При этой



Рис. IV.74а. Общий вид разрушений, вызванных взрывом и пожаром в Техас-Сити 16—17 апреля 1947 г. Расстояние объектов, расположенных на переднем плане от центра взрыва, 1 *км*



Рис. IV.74б. Легкие повреждения резервуаров для хранения жидкого топлива, вызванные непосредственным действием взрыва и летящими **обломками в Техас-Сити (16—17 апреля 1947 г.)**

катастрофе взрывной волной, а также летящими обломками и пожаром было уничтожено и сильно повреждено несколько групп резервуаров. Величина избыточного давления в зоне, где резервуары (главным образом незаполненные) получили сильные повреждения, считается равной 0,2 – 0,3 *кг/см*². Такое давление могло бы быть получено при эквивалентном взрыве ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 2—4 тыс. *т*. Серьезную опасность, которую представляют собой резервуары с горючим в пожарном отношении, можно представить себе при рассмотрении рис. IV.74а, на котором показаны разрушения, вызванные как воздействием взрыва, так и пожаром. На рис. IV.74б показаны относительно небольшие повреждения стенок резервуаров для горючего, произведенные взрывной волной и летящими осколками.

Тяжелые станки

IV.75. Выше, в § IV.59, уже упоминалось о повреждении станочного оборудования при ядерных взрывах в Японии. С целью получения более полных данных, представляющих особый интерес с оборонной точки зрения, в 1955 г. во время испытания в штате Невада воздействию взрыва (максимальное избыточное

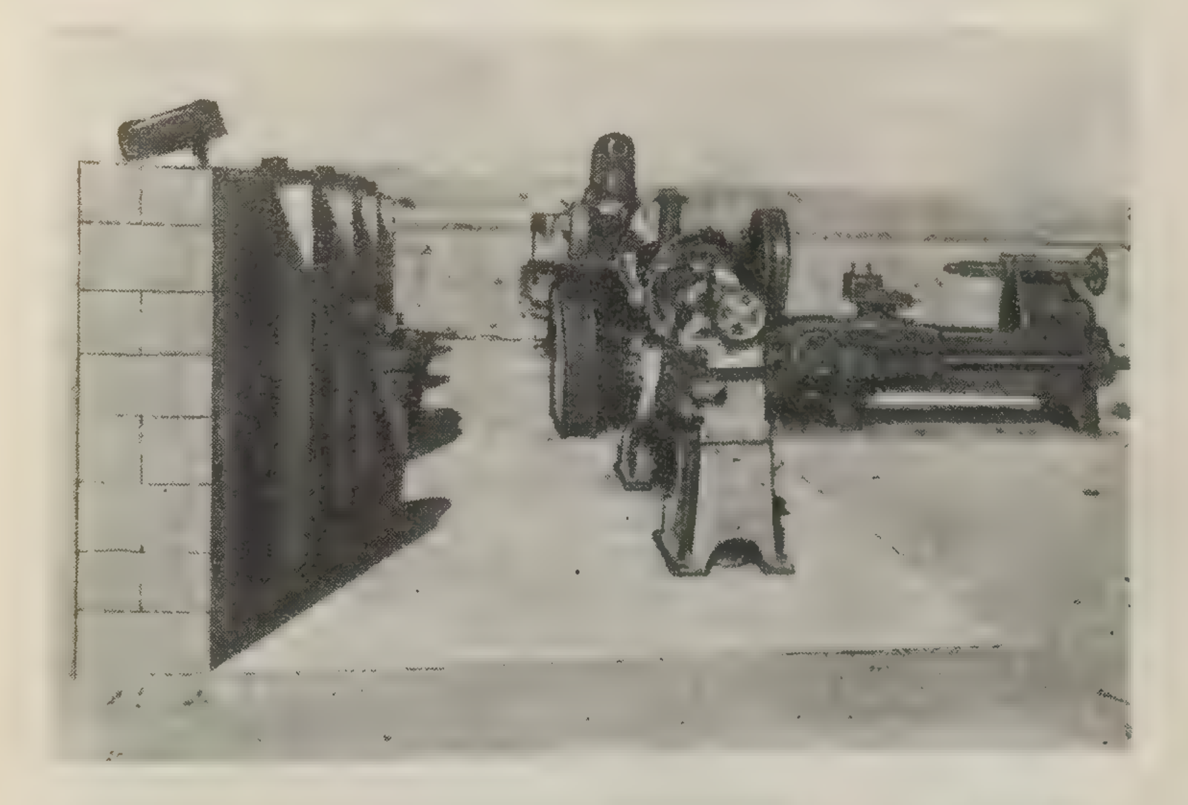


Рис. VI.75. Станочное оборудование, установленное за стеной из бетонных блоков, до ядерного взрыва (полигон в штате Невада)

давление 0,7 *кг/см*²) были подвергнуты тяжелые станки. Станки были установлены на железобетонных фундаментных плитах с соблюдением всех правил, принятых при монтаже станочного оборудования. Для испытаний были использованы два токарных станка (весом 3180 *кг* и 5450 *кг*) и два горизонтальных фрезерных станка (весом 3180 *кг* и 4550 *кг*). Непосредственно перед станками со стороны, обращенной к эпицентру взрыва, из бетонных блоков была возведена стена толщиной 20 *см* и высотой 1,6 *м* (рис. IV.75). Это сооружение должно было имитировать наружную стену промышленного здания; при этом считалось, что при разрушении такой стены образуется достаточное количество летящих обломков.

IV.76. В результате взрыва три более легких станка были сорваны со своих фундаментов и довольно сильно пострадали (рис. IV.76а). Четвертый, самый тяжелый станок повреждений не получил (рис. IV.76б). Из этого можно сделать вывод, что правильно установленные наиболее тяжелые типы станков могут противостоять ударной волне с избыточным давлением 0,7 *кг/см*².

IV.77. Помимо непосредственного действия ударной волны, станки получили значительные повреждения от обломков полностью разрушенной стены из бетонных блоков. Особенно сильно пострадали от обломков наименее прочные и ничем не защищен-



Рис. IV.76а. Повреждения станочного оборудования, вызванные ядерным взрывом (избыточное давление 0,7 *кг/см*²)

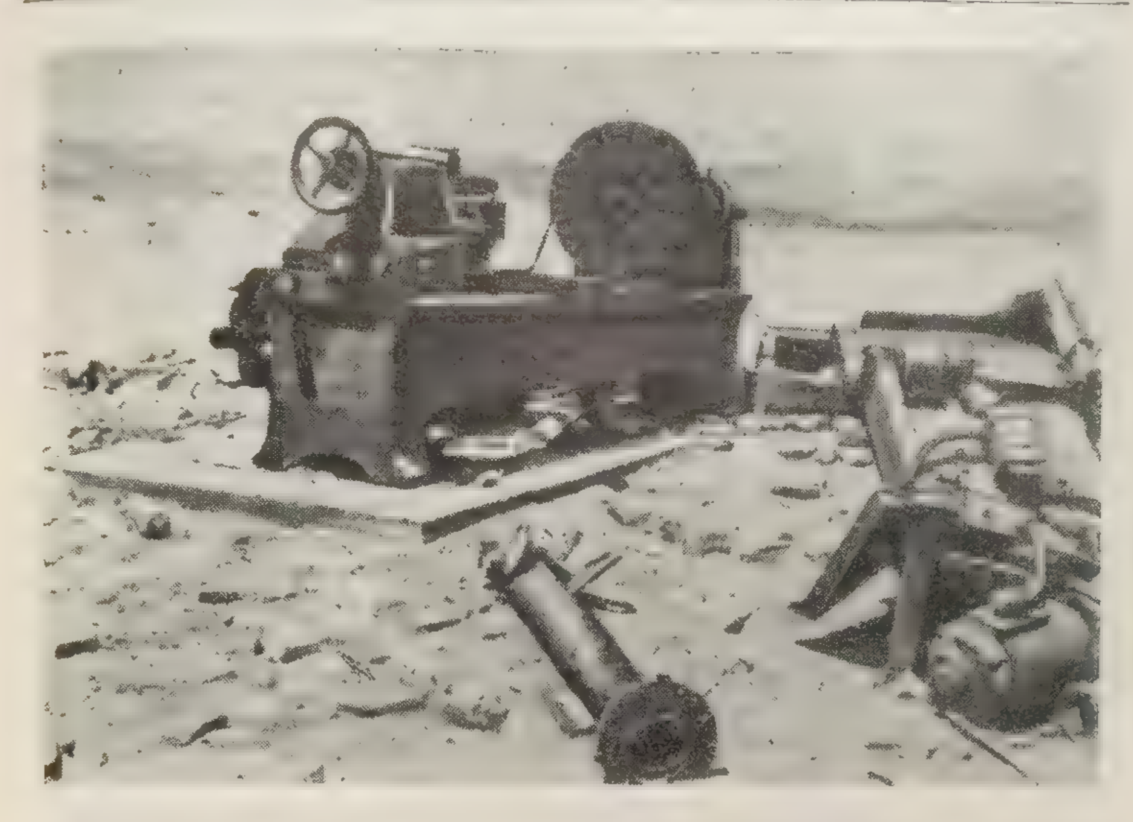


Рис. IV.76б. Тяжелый токарный станок после ядерного взрыва (избыточное давление 0,7 *кг/см²*)

ные наружные детали станков. К числу таких деталей относятся шестерни, передаточные механизмы, коробки скоростей, маховики и рычаги управления, а также приводные ремни. Бóльшая часть этих повреждений может быть легко устранена при наличии запасных частей; для необходимого ремонта в основном не потребуется разборки станков.

IV.78. Под защитой двухэтажного кирпичного дома в зоне, где избыточное давление ударной волны составляло 0,35 *кг/см²* (см. § IV.30), был установлен 20-тонный гидравлический пресс весом около 23 *т*. Установка пресса была произведена с максимальным приближением к реальным заводским условиям. Эта очень высокая машина (5,7 *м*), имеющая небольшие поперечные размеры, получила незначительные повреждения в результате ядерного взрыва, несмотря на то, что кирпичный дом, стоявший перед ней, был разрушен. Очевидно, дом оказал некоторую защиту от непосредственного воздействия ударной волны. Небольшие повреждения пресса, по всей вероятности, были вызваны не непосредственно ударной волной, а падением обломков дома, которые при указанном давлении ударной волны не приобретали высоких скоростей.

IV.79. В зоне, где избыточное давление ударной волны составило 0,2 *кг/см²*, производилось испытание оборудования, установ-

ленного в двух легких стандартных постройках, конструкция которых была описана выше (см. § IV.62). В каждой из этих построек были установлены один вертикально-фрезерный станок весом около 1,36 *т*, баллон высокого давления из нержавеющей стали емкостью около 190 *л* и весом около 1,9 *т* и паровой котел длиной 2,7 *м*, шириной 1,5 *м* и высотой 2,7 *м*. Обе постройки сильно пострадали от взрыва, но оборудование было повреждено незначительно и практически осталось в рабочем состоянии. Только в одном случае обломками разрушенного сооружения были повреждены открытые детали фрезерного станка.

IV.80. Следует отметить, что повреждения станочного оборудования при экспериментальных взрывах 1955 г. были, по всей вероятности, менее значительны, чем повреждения, которые наблюдались в Японии при тех же давлениях ударной волны (см. § IV.59). При проведении испытаний в штате Невада отсутствовали некоторые разрушающие факторы, которые действовали при ядерных взрывах в Японии. Условия испытаний, во-первых, исключали возможность повреждения от пожаров, во-вторых, после взрыва оборудование не подвергалось воздействию атмосферных осадков. Кроме того, количество обломков, образовавшихся в результате разрушения отдельных сооружений при проведении испытаний, очевидно, было гораздо меньше, чем это было при разрушении промышленных зданий в Японии.

ЗДАНИЯ КОММЕРЧЕСКОГО И АДМИНИСТРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

IV.81. Здания, используемые для коммерческих и административных целей, например банки, конторы, больницы, гостиницы, а также крупные многоквартирные жилые дома, как правило, являются более прочными по своей конструкции, чем небольшие жилые дома и легкие постройки промышленного назначения. В основном все данные о действии ударной волны ядерного взрыва на эти многоэтажные сооружения были собраны путем обследования разрушений в Хиросима и Нагасаки. Ниже приводится описание повреждений трех типов таких зданий — зданий с железобетонным каркасом, зданий со стальным каркасом и зданий с несущими стенами.

Многоэтажные здания с железобетонным каркасом

IV.82. Особенно много таких зданий было в Хиросима; в Нагасаки их было меньше. Различные конструкции этих зданий обладали различной устойчивостью к действию ударной волны, но в общем все они поразительно мало пострадали снаружи от ядерного взрыва. Вблизи эпицентра взрыва эти здания сильно постра-



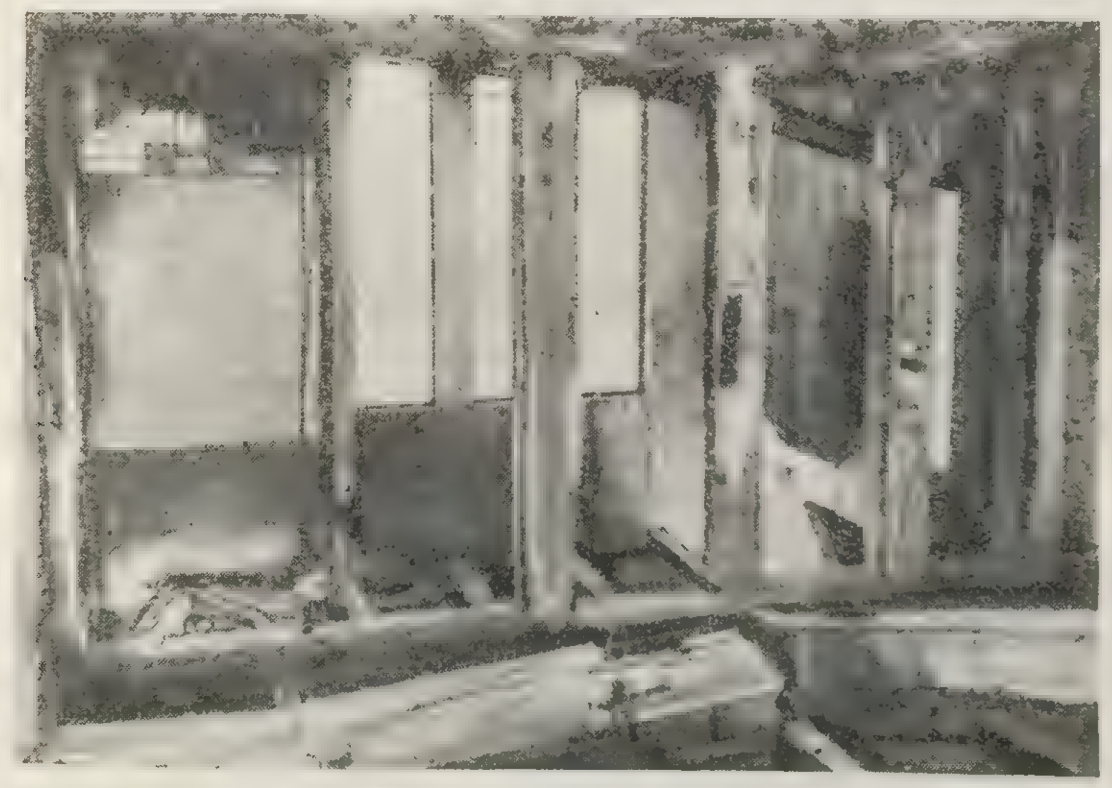


Рис. IV.82а. Верхний фотоснимок - железобетонное, сейсмически устойчивое здание после взрыва в Хиросима (0,19 *км* от эпицентра взрыва); деревянные элементы внутри здания уничтожены пожаром. Нижний фотоснимок — внутренняя часть второго такого же здания, поврежденная взрывом и пожаром



Рис. IV.82б. Разрушение трехэтажного здания с железобетонным каркасом взрывом в Хиросима; стены с кирпичным заполнением толщиной 33 *см* имели большие оконные проемы (0,2 *км* от эпицентра взрыва)

дали внутри вследствие затекания ударной волны через двери и окна, а также вследствие возникновения пожаров. Наружные стены исключительно прочного здания сейсмически устойчивой конструкции, находившегося примерно в 220 *м* от эпицентра взрыва в Хиросима, не пострадали, но крыша его была смята и внутри все разрушено (рис. IV.82а). Другое здание с железобетонным каркасом, близкое по своей конструкции к используемым в США, расположенное примерно на таком же расстоянии от эпицентра взрыва, пострадало сильнее, чем здание с сейсмически устойчивой конструкцией (рис. IV.82б).

IV.83. Повышенную устойчивость к действию ударной волны ядерных взрывов имеют железобетонные здания в Японии, построенные с соблюдением строительных правил, принятых после сильного землетрясения 1923 г. Эти правила допускали строительство зданий высотой не более 30 *м*, способных при таких условиях выдержать горизонтальное давление, равное 10% вертикальной нагрузки. Этими правилами были определены также принципы увеличения жесткости зданий при помощи поперечных стен и улучшения конструкции каркасов. Наиболее важные здания коммерческого и административного назначения были спроектированы и построены в соответствии с требованиями строительных правил. Однако некоторые здания были построены без учета этих требо-

ваний; такие здания оказались менее устойчивыми к действию ударной волны ядерного взрыва.

IV.84. Вблизи эпицентра взрыва вертикальная составляющая ударной волны имеет большую величину, поэтому на близких расстояниях особенно сильному разрушению подвергаются крыши зданий. Под действием направленной вниз силы крыши в зависимости от их прочности оказываются либо вмятыми и продавленными, либо полностью разрушенными. Другие части зданий на близких от эпицентра расстояниях страдают меньше (рис. IV.84а), чем на больших расстояниях, в связи с тем, что в первом случае горизонтальная составляющая нагрузки от ударной волны имеет меньшую величину. Дальше от эпицентра взрыва, в особенности в области отражения Маха, преимущественное значение имеет горизонтальная составляющая нагрузки (рис. IV.84б и в).



Рис. IV.84а. Вдавливание крыши железобетонного здания от действия взрыва в Хиросима (0,16 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.84б. Воздействие горизонтальной составляющей нагрузки на стену здания, обращенную к месту взрыва в Нагасаки (0,64 *км* от эпицентра взрыва)

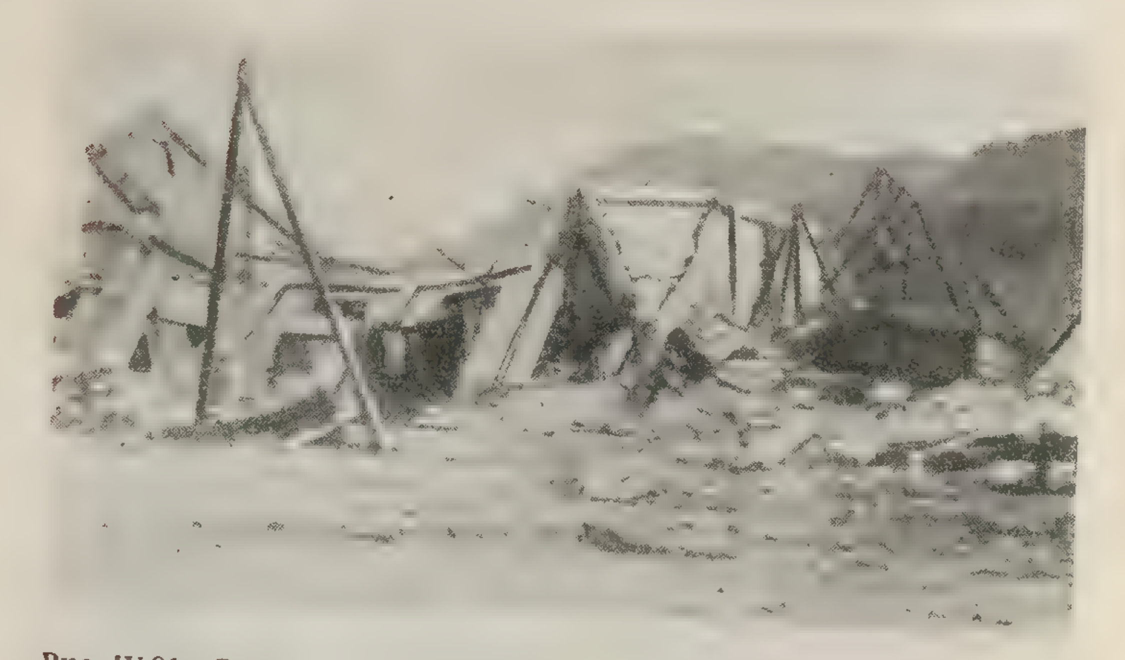


Рис. IV.84в. Разрушение одноэтажного железобетонного здания со стальными стропилами в Нагасаки (0,42 *км* от эпицентра взрыва)

IV.85. Помимо разрушения железобетонных крыш и смещения стен зданий, наблюдались также и другие последствия действия ударной волны, в том числе деформация и разрушение балок, колонн, панелей наружных стен и плит перекрытий (рис. IV.85а, б, в и г). Сильные повреждения потолков, штукатурки и внутренних стен наблюдались даже на расстоянии 2,7 *км* от эпицентра взрыва, оконные стекла оказывались выбитыми во всех зданиях, расположенных на расстоянии до 6 *км*, а в некоторых случаях и на расстоянии до 13 *км* от эпицентра взрыва.

IV.86. Описанные выше последствия взрыва относятся главным образом к железобетонным зданиям; здания такого типа разрушились частично, и это дало возможность изучить более детально непосредственное воздействие ударной волны. Следует отметить, однако, что аналогичные повреждения наблюдались также и в других типах сооружений, описание которых следует ниже.

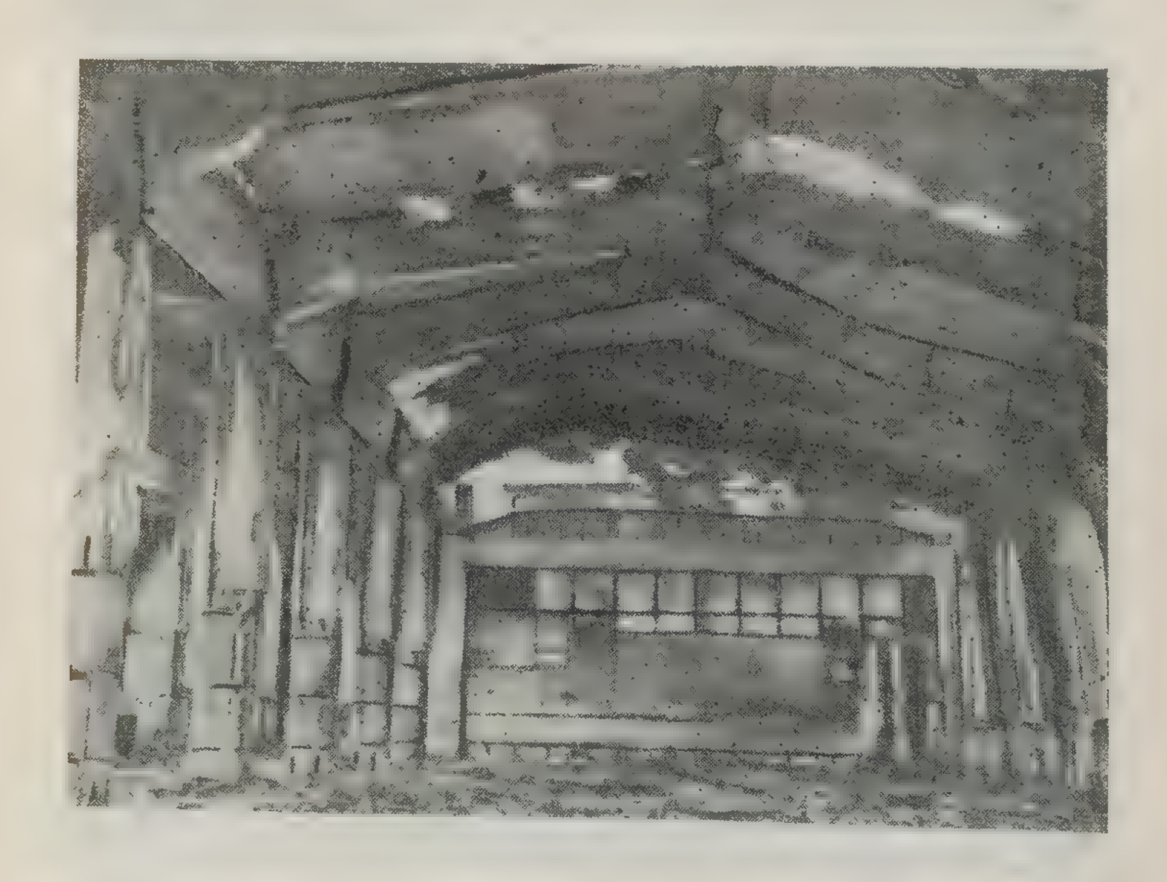


Рис. IV.85а. Образование прогиба и растрескивание балок здания из железобетонных конструкций в результате взрыва в Нагасаки (0,51 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.85б. Характер разрушений колонн и балок в многоэтажном здании с железобетонным каркасом, вызванных взрывом в Нагасаки (0,58 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.85в. Разрушение здания с железобетонным каркасом взрывом в Нагасаки; со стороны, обращенной к взрыву, в стеновых бетонных панелях образовались бреши (1,1 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.85г. Разрушение железобетонного здания взрывом в Хиросима; на фотоснимке показано разрушение железобетонных плит крыши и перекрытия (0,16 *км* от эпицентра взрыва)

Многоэтажные здания со стальным каркасом

IV.87. В японских городах, подвергшихся атомной бомбардировке, было, по-видимому, только одно здание со стальным каркасом высотой более двух этажей. Это было пятиэтажное здание в Нагасаки, находившееся на расстоянии 1,35 *км* от эпицентра взрыва (рис. IV.87). Наименее прочной частью этого здания была крыша, состоявшая из железобетонных плит толщиной 10 *см* и очень легких стальных стропильных ферм. В результате взрыва произошло оседание крыши на 0,9 *м*, что являлось единственным наиболее крупным повреждением этого здания.

IV.88. Здания с железобетонным каркасом, находившиеся на том же расстоянии от эпицентра взрыва, также не были повреждены. Такое положение не дало возможности получить достаточных данных для того, чтобы сделать вывод об относительной устойчивости той и другой конструкции. Характер повреждения двухэтажных зданий со стальным каркасом показан на рис. IV.88.

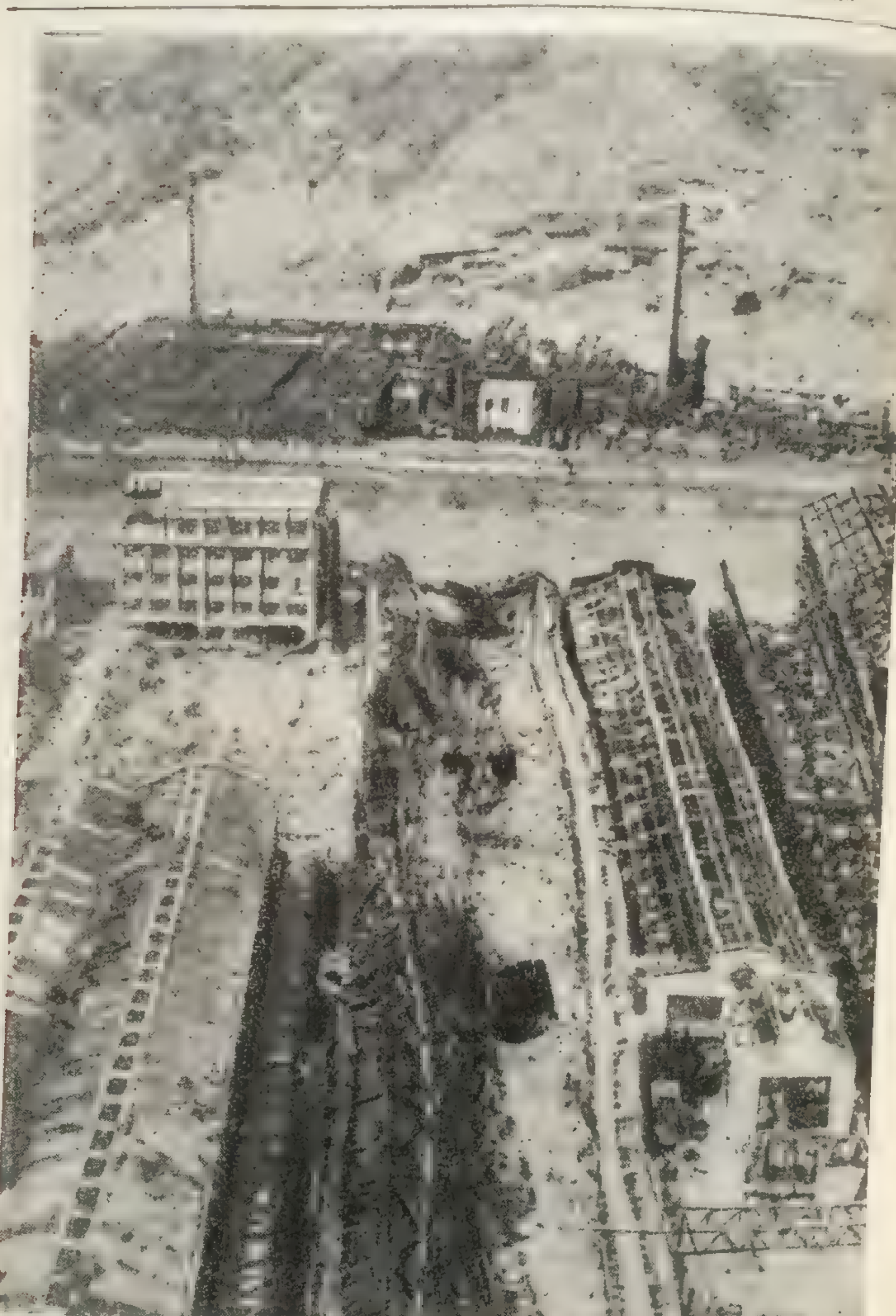


Рис. IV.87. Многоэтажное здание со стальным каркасом после взрыва в Нагасаки (слева в средней части фотоснимка; 1,35 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.88. Двухэтажное здание со стальным каркасом и железобетонными стеновыми панелями толщиной 18 *см* после взрыва в Хиросима; колонны первого этажа обрушились и разрушили междуэтажное перекрытие (0,64 *км* от эпицентра взрыва)

Здания с несущими стенами

IV.89. Небольшие здания с легкими несущими стенами оказывают незначительное сопротивление ударной волне и, как правило, разрушаются полностью при ядерном взрыве. Более крупные здания того же типа, но более прочной конструкции с наличием внутренних поперечных стен оказались устойчивее, но и они также получали сильные повреждения на расстоянии до 2 *км* от эпицентра взрыва (рис. IV.89а и б). Даже в тех случаях, когда эти здания не обрушивались, в их стенах образовывались трещины, в особенности в местах примыкания поперечных стен. Это указывает на то, что здания с несущими стенами не обладают достаточной устойчивостью к воздействию больших горизонтальных нагрузок.



Рис. IV.89а. Внутренняя часть двухэтажного кирпичного здания с несущими стенами толщиной 48 *см*, разрушенного взрывом в Хиросима (1,3 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.89б. Здание с массивными кирпичными несущими стенами толщиной 71 *см*, разрушенное взрывом в Нагасаки (0,55 *км* от эпицентра взрыва)

Мосты

IV.90. Действию ядерных взрывов в Хиросима и Нагасаки подверглись мосты нескольких типов. Деревянные мосты были уничтожены главным образом в результате пожаров. Разрушения металлических мостов были относительно невелики (рис. IV.90а, б и в). Металлический балочный мост с железобетонной проезжей ча-



Рис. IV.90а. Мост с железобетонной проезжей частью и металлическим пролетным строением, поврежденный взрывом в Хиросима (80 *м* от эпицентра взрыва). Продольные балки снаружи облицованы бетоном. Перила снесены ударной волной взрыва; проезжая часть повреждена незначительно и допускала движение по мосту

стью, находившийся всего лишь в 80 *м* от эпицентра взрыва, то есть примерно в 630 *м* от центра взрыва, не имел признаков существенных повреждений. По-видимому, под давлением ударной волны он претерпел только упругую деформацию с очень незначительным конечным смещением. Конструкции других мостов, находившихся на бóльшем расстоянии от эпицентра взрыва, имели значительные поперечные смещения. На одном из мостов железобетонная проезжая часть была приподнята над пролетным строением. Это произошло, по-видимому, вследствие отражения ударной волны от поверхности воды.



Рис. IV.90б. Металлический двухпутный мост для трамвайного движения, поврежденный взрывом в Нагасаки (260 *м* от эпицентра взрыва). Балки моста сдвинуты в результате взрыва на 1 *м*, рельсы изогнуты, трамвайные вагоны разрушены; опоры контактной линии не повалены



Рис. IV.90в. Железобетонный мост с пролетным строением из тавровых балок, частично разрушенный взрывом в Нагасаки (700 *м* от эпицентра взрыва). Элементы пролетного строения одного пролета длиной 10 *м* в результате взрыва сброшены в реку, остальная часть моста осталась почти неповрежденной

ТРАНСПОРТ

Трамваи и автомобили

IV.91. В японских городах, подвергшихся воздействию ядерных взрывов, трамвайный парк сильно пострадал от взрывной волны и огня, но многие опоры контактной сети уцелели (рис. IV.90б). Автобусы и автомобили, находившиеся вблизи эпицентра взрыва, в результате воздействия ударной волны, огня, а также летящих

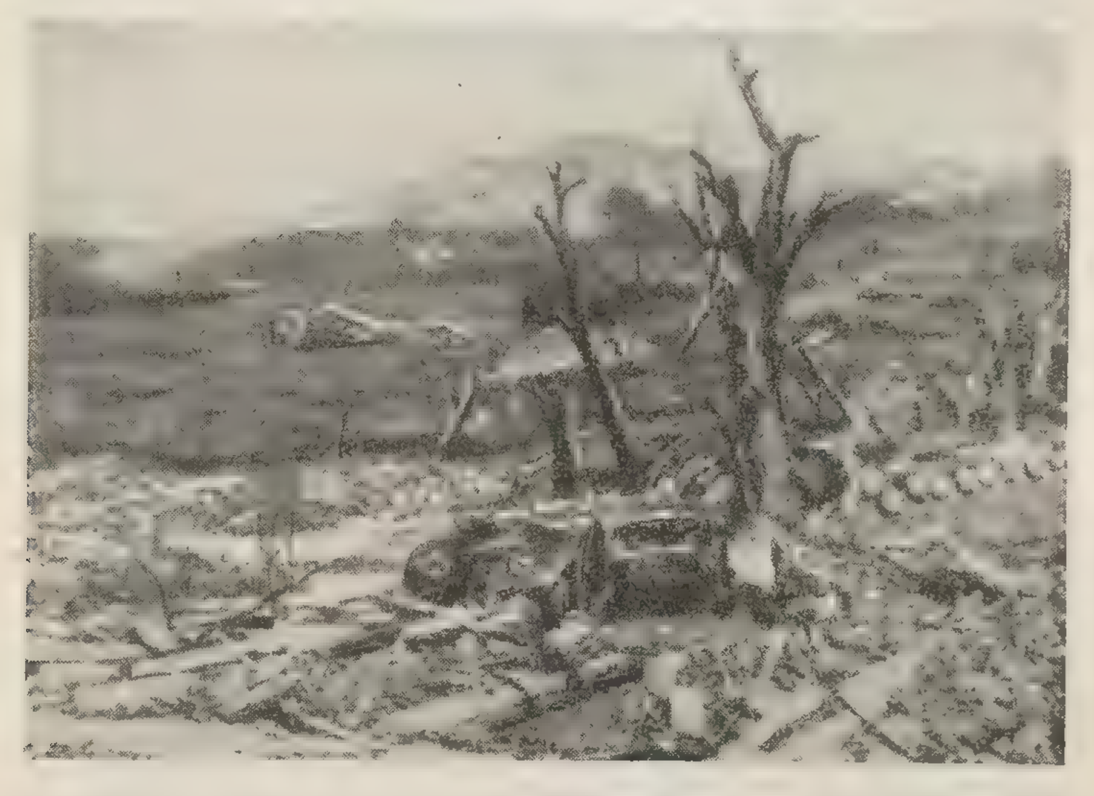


Рис. IV.91. Общий вид разрушений в районе Нагасаки; на переднем плане видны обломки автомобиля (0,9 *км* от эпицентра взрыва)

осколков были совершенно выведены из строя. Автомобили, находившиеся на достаточном удалении от эпицентра взрыва, пострадали сравнительно мало. Так, например, автомобиль американского производства, находившийся на расстоянии около 900 *м* от эпицентра взрыва, был разрушен взрывом и огнем (рис. IV.91). Другой такой же автомобиль, находившийся на расстоянии 1,8 *км*, получил лишь незначительные повреждения.

IV.92. Устойчивость автомобилей и автобусов к воздействию ядерного взрыва определялась также и при ядерных испытаниях в штате Невада. Условия этих испытаний несколько отличались от условий, имевших место в Японии, в особенности в отношении косвенных повреждений. Ниже указываются величины избыточного

давления, которому подвергались испытываемые автомобили. Следует, однако, учитывать, что в большинстве случаев основной причиной, вызывавшей повреждения автомобилей, являлось не избыточное давление, а скоростной напор. Поэтому нельзя определять характер разрушений только по величине избыточного давления,



Рис. IV.92а. Действие ядерного взрыва на автомобили, сосредоточенные на открытом участке (для оценки воздействия на полевые парки автотранспорта). Преобладающая часть повреждений стекол, покраски, внутренней отделки автомобилей вызвана воздействием светового излучения ядерного взрыва (полигон в штате Невада)

а необходимо пользоваться также таблицей, приведенной в гл. VI (рис. VI.41в), учитывающей оба эти фактора. Некоторое представление о действии ядерных взрывов на автомобили можно составить по фотоснимкам на рис. IV.92а, б, в, г. При максимальном избыточном давлении ударной волны 0,35 *кг/см*² автомобили получили сильные внешние повреждения: на кузовах легковых автомобилей сверху и с боков образовались вмятины, были сорваны капоты и выбиты стекла Двигатели, однако, оставались в рабочем состоянии, и после взрыва автомобили могли двигаться своим ходом. Даже при более высоких давлениях ударной волны, когда общие повреждения были еще более значительными, двигатели оставались в исправном состоянии.

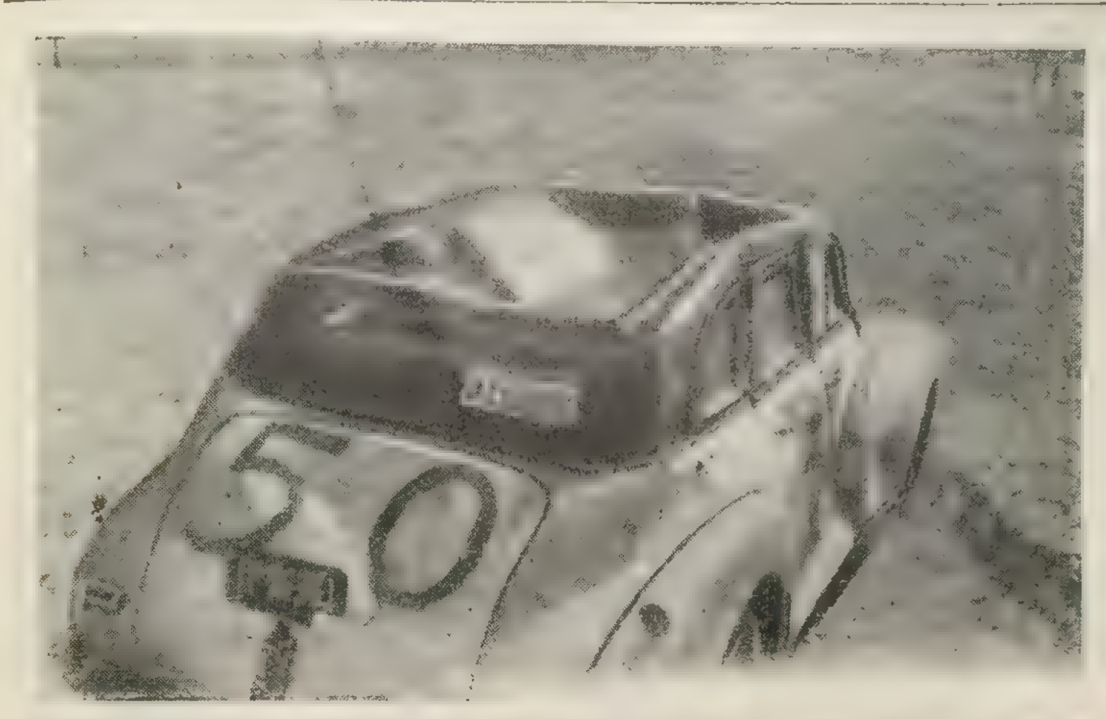


Рис. IV.92б. Повреждения автомобиля, находившегося за домом с деревянным каркасом (избыточное давление 0,35 *кг/см²*); переднюю часть этого автомобиля можно видеть на рис. IV.14. Несмотря на сильные повреждения, автомобиль после взрыва мог двигаться своим ходом



Рис. IV.92в. Повреждения городского автобуса, вызванные ядерным взрывом (полигон в штате Невада); этот автобус, так же как и другой (слева на заднем плане), был опрокинут и отброшен на 15 *м*

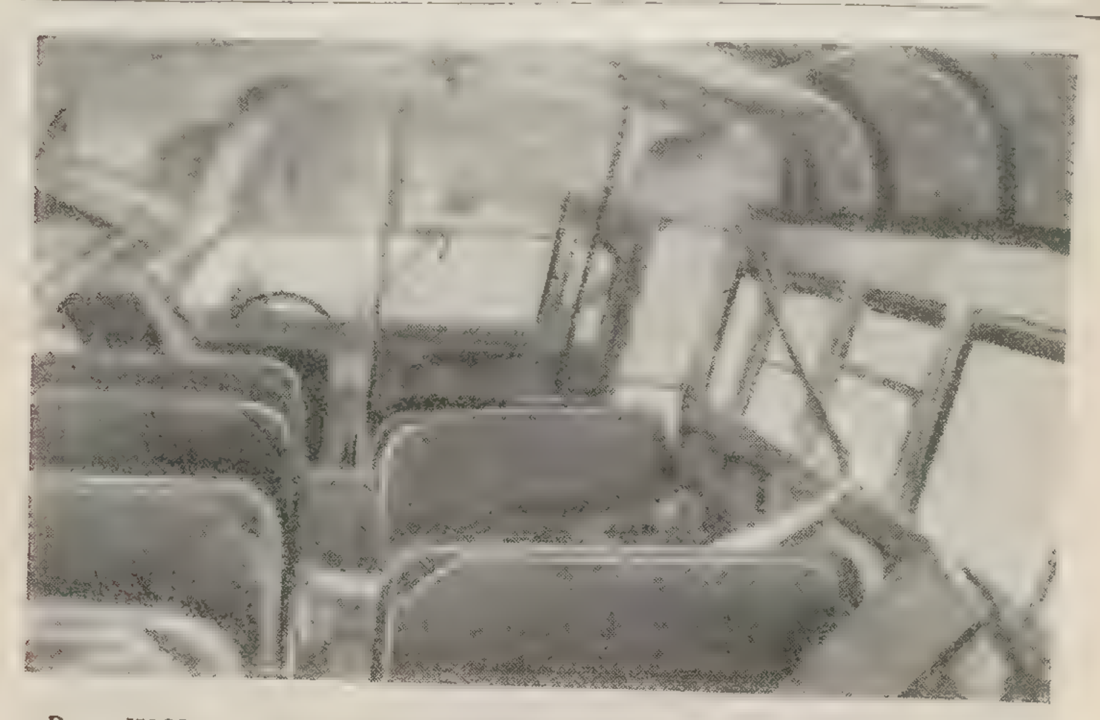


Рис. IV.92г. Повреждения внутреннего оборудования автобуса (внешний вид показан на рис. IV.92в), вызванные действием ударной волны и светового излучения

Аварийные машины

IV.93. В 1955 г. в штате Невада были испытаны различные автомобили технической помощи и их оборудование с целью выяснения возможности их использования немедленно после ядерного нападения. В числе таких автомобилей были испытаны: аварийный автомобиль, автомобиль технической помощи службы газовых и электрических сетей, автомобиль технической помощи телефонной службы и некоторые пожарные автомобили. Один из этих автомобилей подвергался воздействию избыточного давления, равного 2,1 *кг/см²*, два испытывались при давлении 0,35 *кг/см²*, два — при давлении 0,12 *кг/см²* и шесть — при давлении 0,07 *кг/см²*. Следует отметить, однако, что избыточное давление не является единственным фактором, определяющим степень повреждения автомашин (см. рис. VI.41в).

IV.94. Специальный автомобиль, подвергшийся избыточному давлению 2,1 *кг/см²*, был полностью уничтожен, и после взрыва удалось найти только одно его колесо и часть оси. При избыточном давлении 0,35 *кг/см²* тяжелый автомобиль технической помощи энергослужбы, обращенный передней частью к месту взрыва, получил следующие повреждения: было разбито ветровое стекло, помяты обе дверцы и кабина, частично сорван капот и смята дверца инструментального ящика (рис. IV.94). Ни инструменты, ни оборудование автомобиля не пострадали, и после взрыва он

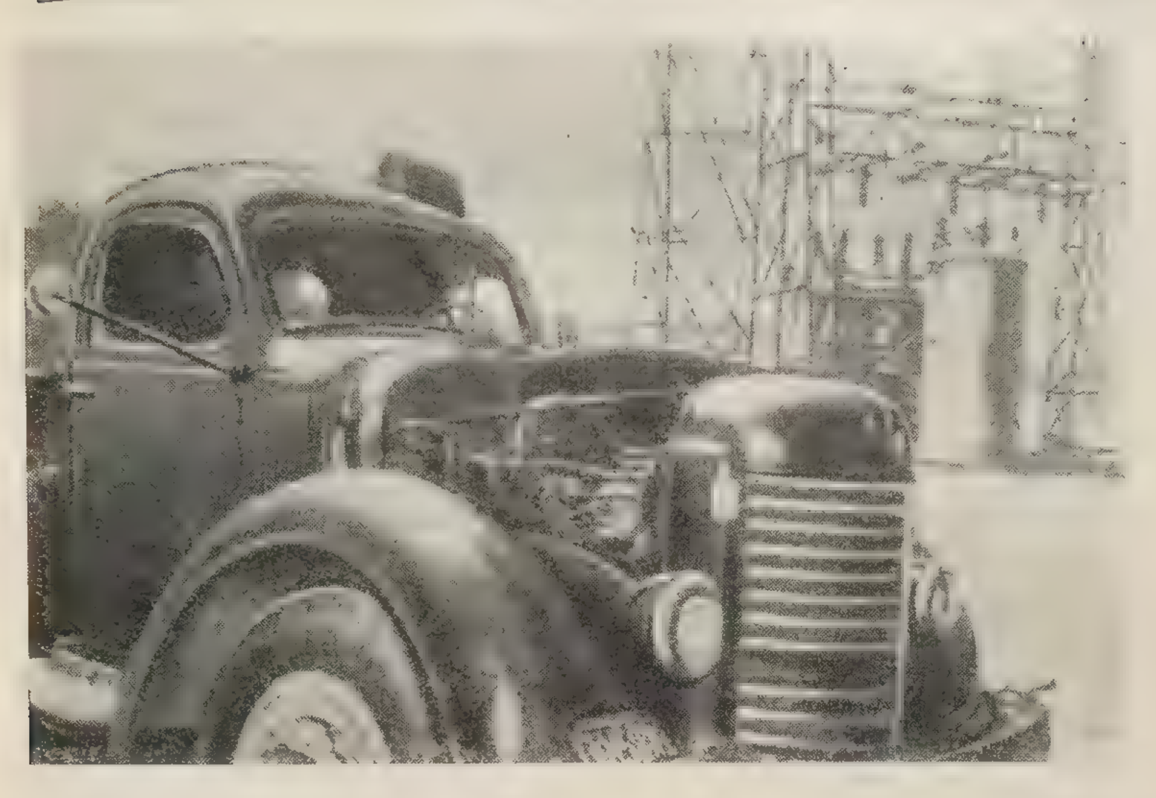


Рис. IV.94. Незначительное повреждение тяжелого специального автомобиля (избыточное давление 0,35 *кг/см*²)

мог двигаться своим ходом. Стоявший на той же дистанции автомобиль с буровым станком, установленный перпендикулярно к направлению распространения ударной волны, был опрокинут и получил некоторые повреждения, но не вышел из строя. Буровой станок, прикрепленный болтами к шасси автомобиля, был сорван с шасси, его бензиновый и водяной баки дали течь.

IV.95. Легкий специальный автомобиль энергослужбы и пожарный автомобиль, находившиеся в зоне действия избыточного давления, равного 0,12 *кг/см*², получили лишь легкие повреждения: были выбиты стекла и образовались вмятины.

В обоих случаях оборудование не пострадало, и оба автомобиля могли быть использованы сразу после взрыва. Остальные автомобили различного назначения, подвергшиеся избыточному давлению 0,07 *кг/см*², получили лишь легкие повреждения.

IV.96. Приведенные данные позволяют сделать вывод, что аварийные автомобили различных служб имеют прочную конструкцию и могут противостоять избыточному давлению ударной волны, равному приблизительно 0,35 *кг/см*² (а также зависящему от него скоростному напору), оставаясь в рабочем состоянии. Инструменты и оборудование благодаря размещению их в специальных отделениях с прочными дверцами или в кузовах автомобилей защищены от непосредственного воздействия ударной волны.

Железнодорожный подвижной состав

IV.97. Сильное повреждение железнодорожного подвижного состава имело место как при ядерных взрывах в Японии, так и во время одного из испытаний в штате Невада. Подобно автотранспортным средствам, объекты железнодорожного транспорта главным образом чувствительны к воздействию скоростного напора, вследствие чего полученные повреждения нельзя объяснить только воздействием избыточного давления. При максимальном избыточном давлении 0,14 *кг/см²* деревянный товарный вагон без груза получил относительно небольшие повреждения. Такой же груженый вагон при избыточном давлении 0,28 *кг/см²* получил более тяжелые повреждения (рис. IV.97а). При избыточном давлении 0,42 *кг/см²* пустой товарный вагон весом около 20 *т* был сорван с тележки и отброшен примерно на 2 *м*. Тележка вагона была также сброшена с рельсов, очевидно, в связи с тем, что она была соединена с вагоном при помощи тормозных тяг. Товарный вагон, загруженный песком в мешках общим весом 30 *т*, находившийся в той же зоне, остался на рельсах (рис. IV.97б). Хотя стенки и крыша вагона получили сильные повреждения, его ходовая часть оставалась исправной, вагон мог двигаться по рельсам. При давлении 0,5 *кг/см²* груженый вагон такого же типа был сброшен с рельсов и опрокинут, а при давлении 0,63 *кг/см²* полностью разрушен.

IV.98. Тепловоз весом 46 *т* был подвергнут воздействию удар-



Рис. IV.97а. Товарный деревянный вагон после ядерного взрыва (избыточное давление 0,28 *кг/см²*)

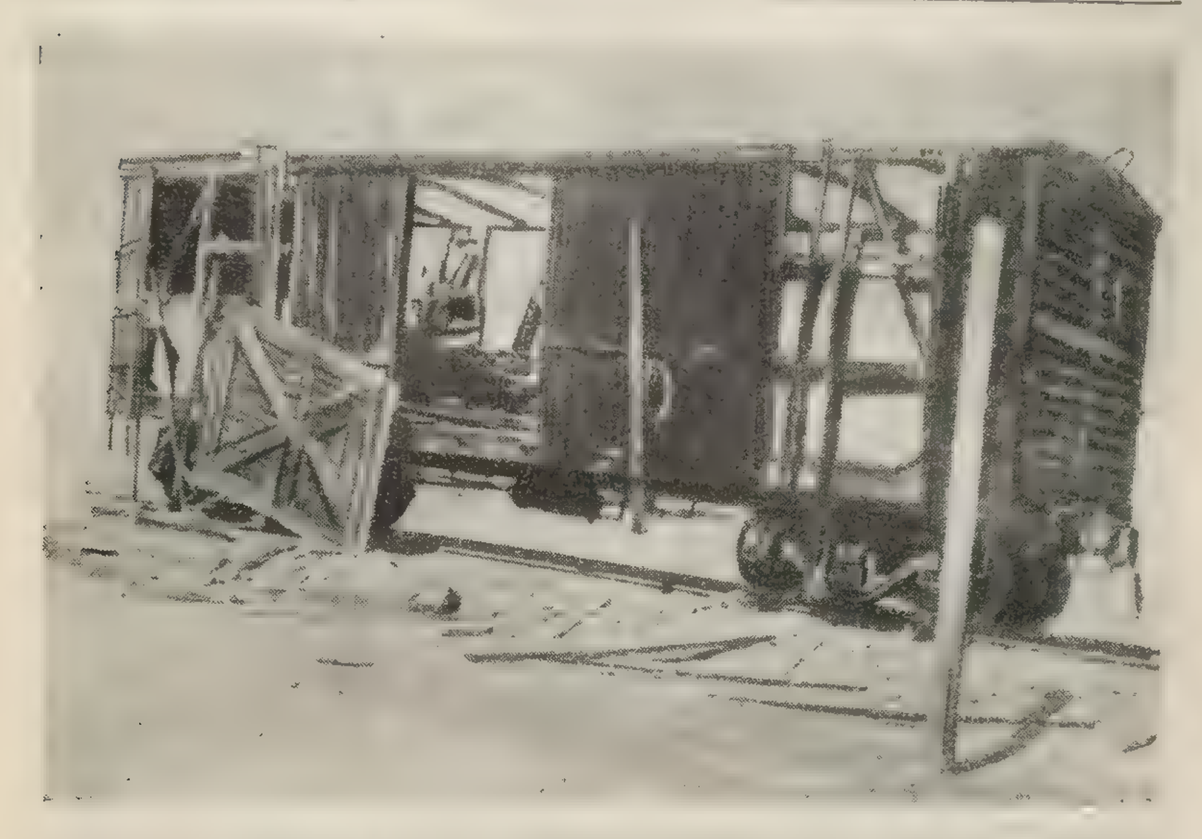


Рис. IV.97б. Товарный деревянный вагон после ядерного взрыва (избыточное давление 0,42 *кг/см*²)

ной волны с избыточным давлением, равным 0,42 *кг/см*², во время работы двигателя. После взрыва двигатель тепловоза продолжал нормально работать, несмотря на повреждение окон, дверей и стенок тепловоза. Железнодорожный путь при этом давлении поврежден не был.

Транспортные самолеты на аэродромах

IV.99. Транспортные самолеты получают повреждения уже при таком низком избыточном давлении ударной волны, как 0,07—0,14 *кг/см*². Можно предполагать, что при избыточном давлении 0,3—0,4 *кг/см*² они будут полностью разрушаться или приходить в такое состояние, при котором восстановление их окажется совершенно нецелесообразным. В пределах указанных величин избыточного давления главным разрушающим фактором, по-видимому, является это давление (а не скоростной напор). Однако опыты свидетельствуют о том, что при одном и том же избыточном давлении самолеты, обращенные носовой частью к месту взрыва, повреждаются меньше, чем самолеты, обращенные к месту взрыва боковой стороной или хвостовой частью.

IV.100. Повреждения самолета, обращенного левой стороной к месту взрыва, при избыточном давлении 0,25 *кг/см*² показаны на



Рис. IV.100а. Самолет после ядерного взрыва: фюзеляж самолета ориентирован перпендикулярно к направлению распространения ударной волны (избыточное давление 0,25 *кг/см²*)



Рис. IV.100б. Повреждения самолета, обращенного хвостовой частью в сторону взрыва (избыточное давление 0,17 *кг/см²*)

рис. IV.100а. В результате взрыва сильно поврежден фюзеляж самолета. Сильно деформировались обшивки фюзеляжа и стабилизаторов и капоты моторов. На рис. IV.100б показаны повреждения самолета, ориентированного хвостовой частью к месту взрыва и подвергшегося действию максимального избыточного давления 0,17 *кг/см²*. Как видно из рисунка, обшивка вертикального стабилизатора, горизонтальных стабилизаторов, поверхности крыла выше элеронов и наружные части крыла были смяты. Деформированы перемычки вертикального стабилизатора и каркас фюзеляжа около кабины.

Суда

IV.101. Данные о воздействии воздушной волны на суда и их оборудование были получены в результате испытания «Эйбл» (взрыв в воздухе атомной бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*) у Бикини в июле 1946 г. По имеющимся данным, суда всех типов, находившиеся на расстоянии 0,75—0,9 *км* от эпицентра взрыва, т. е. подвергшиеся максимальному избыточному давлению приблизительно от 0,7 до 0,84 *кг/см²*, были серьезно повреждены (рис. IV.101а и б) или потоплены. Умеренные повреждения были нанесены судам, находившимся на расстоянии 1,35 *км* (максимальное избыточное давление равно 0,4 *кг/см²*), а в радиусе 1,8 *км* (максимальное избыточное давление равно 0,28 *кг/см²*) наблюдались лишь мелкие повреждения.

IV.102. В случаях, когда корабль оставался на плаву, его машинное оборудование оказывалось неповрежденным. Исключением являются котлы и вытяжные устройства, легко повреждающиеся ударной волной, что и явилось в большинстве случаев основной причиной постановки судна на ремонт. Котлы серьезно повреждались на расстоянии до 0,8 *км*; на расстоянии до 1,2 *км* повреждения были умеренными, а на расстоянии до 1,5 *км* — легкими. Этим расстояниям соответствуют величины избыточного давления, равные соответственно 0,77, 0,56 и 0,35 *кг/см²*.

IV.103. Задраивание иллюминаторов перед ядерным взрывом не предохраняло от серьезных повреждений легкие конструкции и чувствительное к ударной нагрузке оборудование, находившееся внутри судна. Возможно, что эти повреждения можно было бы ослабить при помощи амортизационных устройств.

IV.104. Особенно сильно повреждаются при ядерном взрыве ничем не защищенные палубные надстройки (рис. IV.104а и б). Мачты, рангоуты и радиолокационные антенны очень чувствительны к нагрузке торможения, и поэтому повреждения, испытываемые ими, определяются главным образом скоростным напором и длительностью положительной фазы ударной волны. Следует считать, что характер воздействия взрыва на аналогичные наземные объекты будет такой же.



Рис. IV.101а. Американский военный корабль *Криттенден* после испытаний „Эйбл"; взрывом вызваны умеренные повреждения (0,75 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.101б. Характер повреждений палубных надстроек военного корабля *Криттенден*; на фотоснимке видны сломанные мачты, деформированные трубы и поврежденный мостик

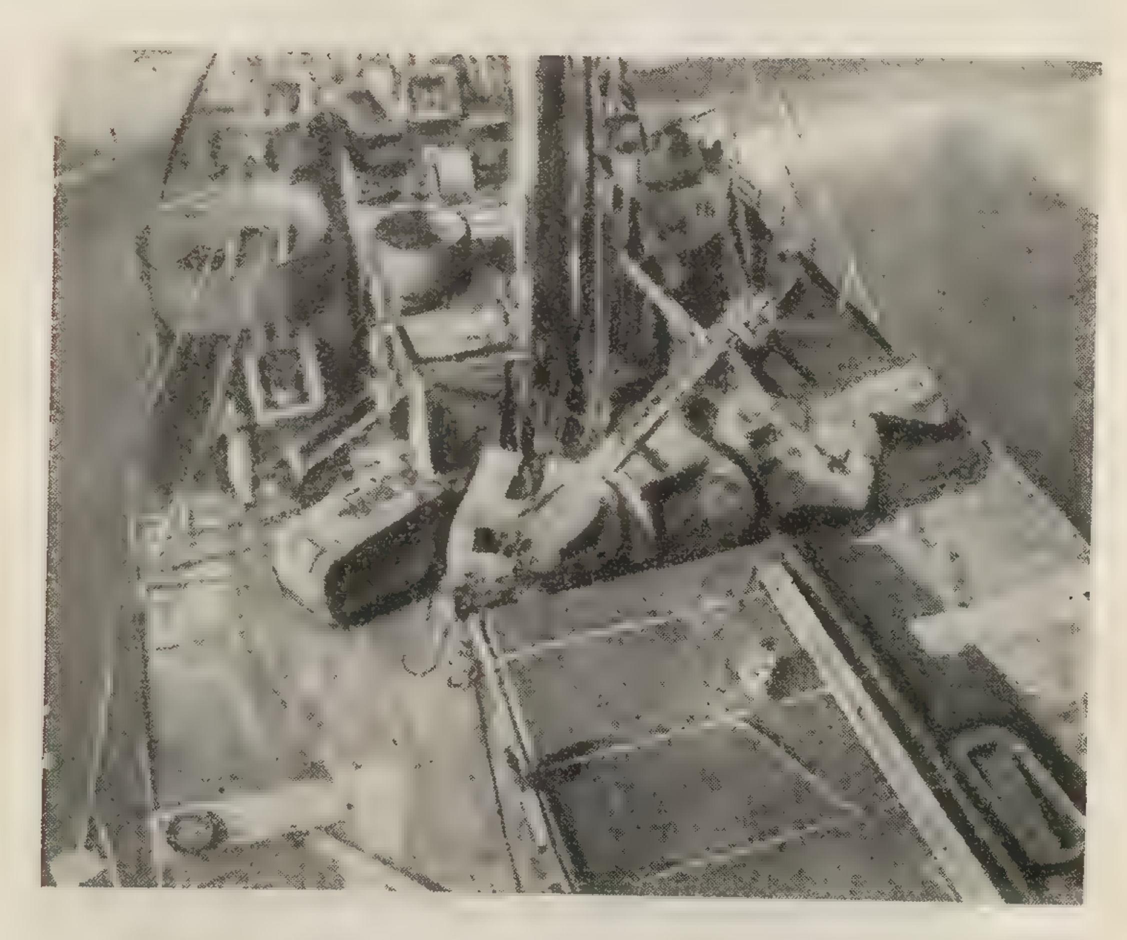


Рис. IV.104а. Повреждения в носовой части военного корабля *Криттенден*, вызванные ядерным взрывом „Эйбл"



Рис. IV.104б. Повреждения на корме

КОММУНАЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ И СРЕДСТВА СВЯЗИ

Линии электропередач

IV.105. При ядерных взрывах в Японии сильно пострадали также линии электропередач. Столбы воздушных линий электропередач были уничтожены взрывной волной или огнем. Воздушные линии сильно пострадали на расстоянии до 2,7 *км* от эпицентра взрыва (рис. IV.105). Подземные линии электропередач пострадали мало. Переключатели и трансформаторы получили повреждения главным образом в результате разрушения зданий, в которых они находились. Повреждения электромоторов и генераторов вызывались пожарами.

IV.106. Во время испытаний 1955 г. в штате Невада довольно подробному изучению подвергся вопрос о действии ядерного взрыва на систему электроснабжения. Целью этого изучения было: 1) определить, при каком максимальном давлении ударной волны стандартное электрооборудование практически не повреждается; 2) определить масштабы и характер повреждений, которые можно ожидать при ядерном нападении; 3) определить характер ремонтных работ, необходимых для возобновления подачи электроэнергии в районах, где жилые дома и предприятия окажутся после взрыва в удовлетворительном состоянии, допускающем их использование после некоторого ремонта. Для этого были подготовлены две одинаковые системы электроснабжения, одна из которых должна была подвергнуться избыточному давлению ударной волны около 0,42 *кг/см²*, а другая — 0,12 *кг/см²*. Следует напомнить, что при давлении ударной волны, равном примерно 0,12 *кг/см²*, типичным американским жилым домам наносятся легкие повреждения, допускающие быстрое их восстановление.

IV.107. Каждая из испытывавшихся энергосистем состояла из высоковольтной (69 тыс. *в*) линии электропередачи, имевшей стальные опоры и подключенной к обычной наружной трансформаторной подстанции и типичной воздушной распределительной линии, присоединенной к трансформаторной подстанции и подвешенной на 15 деревянных столбах (высота столбов 13,5 *м*; столбы заглублены в землю на 1,8 *м*). От этой линии шли вводы, подключенные к оборудованию, установленному в некоторых из домов, испытание которых было описано выше. Такие энергосистемы обычно применяются в населенных пунктах городского типа.

Наряду с этим испытывалось также оборудование, применяемое для энергоснабжения крупных промышленных предприятий. Оно было представлено высоковольтной линией электропередачи на 69 тыс. *в* с высоковольтным распределительным устройством, с масляными выключателями и трансформатором.

IV.108. При избыточном давлении ударной волны ядерного взрыва, равном 0,35 *кг/см²*, система электроснабжения пострадала

Рис. IV.105. Повреждение опоры электросети, вызванное взрывом в Хиросима (1,3 *км* от эпицентра взрыва)

не очень сильно. По своему характеру повреждения напоминали последствия сильных ураганов. Помимо непосредственного воздействия ударной волны, некоторые повреждения энергосистемы были вызваны ударами летящих предметов.

IV.109. Повреждение высоковольтной линии в результате взрыва заключалось в падении одной из опорных мачт, а в связи с этим и части проводов (рис. IV.109а). Следует отметить, что конечная



Рис. IV.109а. Падение мачты высоковольтной линии электропередачи, вызванное взрывом ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* — полигон в штате Невада (избыточное давление 0,35 *кг/см*²)

опора, которая была значительно тяжелее и прочнее, и еще одна опора несколько более прочной конструкции были повреждены незначительно (рис. IV.109б). В некоторых районах США применяются опоры подобной тяжелой конструкции. Однако сооружения этого типа чувствительны к скоростному напору, поэтому величина избыточного давления не является единственным фактором, определяющим степень повреждения.

IV.110. Трансформаторная подстанция в результате воздействия ударной волны получила сравнительно небольшие повреждения. В результате взрыва был сильно разбит металлический контейнер, в котором помещались измерительные приборы, батареи и реле; однако в чрезвычайных условиях энергосистема может функционировать и без подстанции с ее оборудованием; 4-киловольтные регуляторы были смещены взрывом со своих бетонных оснований,

что привело к нарушению их контакта с шинами. Стеклянные банки аккумуляторных батарей были разбиты, и большая часть аккумуляторных пластин приведена в полную негодность. В то же время реле, измерительные и другие приборы не пострадали, если не считать разбитых защитных стекол. В целом подстанция была в достаточно удовлетворительном состоянии, допускавшем эксплуатацию при неавтоматическом (ручном) управлении. При замене аккумуляторных батарей можно было бы возобновить работу с автоматическим управлением.



Рис. IV.109б. Конечные опорные мачты высоковольтной линии электропередачи после ядерного взрыва на полигоне в штате Невада (тротиловый эквивалент 30 тыс. *т*, избыточное давление 0,35 *кг/см²*)

IV.111. Из 15 деревянных столбов, использованных для подвески проводов, соединявших подстанцию с потребителями, четыре были сломаны и повалены, а два сильно повреждены (рис. IV.111). Падение столбов отчасти объяснялось весом и прочностью проводов. Другие повреждения были, видимо, получены в результате ударов летящих предметов.

IV.112. Некоторые распределительные трансформаторы силой взрыва были сорваны со столбов; были сорваны также вторичные провода и вводы. Другие трансформаторы, концевые муфты, разрядники, выключатели, воздушные кабели остались неповрежденными. Для восстановления этой линии необходимо произвести некоторые ремонтные работы, которые, по-видимому, можно закончить приблизительно за одни сутки с использованием обычных материалов, имеющихся на складах электрических компаний.



Рис. IV.111. Столбы линии электропередачи, поваленные ядерным взрывом в штате Невада (тротиловый эквивалент 30 тыс. *т*, избыточное давление 0,35 *кг/см*²)

Газовые, водопроводные и канализационные сети.

IV.113. Система коммунального хозяйства Нагасаки была аналогична системам, существующим в более мелких городах США, за исключением того, что в канализационной системе Нагасаки использовались также открытые каналы. Наиболее значительный ущерб был нанесен системе водоснабжения, благодаря чему вести борьбу с пожарами было почти невозможно. Давление воды в водопроводе упало в результате разрыва труб внутри зданий или в местах ввода их в здания и сооружения. Подземные магистрали не повреждались. Единственным исключением был разрыв чугунной 12-дюймовой водопроводной магистрали, проложенной на участке с насыпным грунтом, на глубине 0,9 *м*. На поверхности этого участка образовался ряд углублений. Разрыв трубы, вероятно, произошел вследствие наличия этих углублений, а также вследствие неравномерного смещения магистрали (рис. IV.113а и б).

IV.114. При ядерных взрывах в Японии не было отмечено значительных повреждений резервуаров и очистных сооружений. Эти сооружения, как и всюду, были расположены далеко за городом и оказались поэтому практически вне зоны действия взрыва.

IV.115. Газгольдеры, расположенные на расстоянии до 1,8 *км* от эпицентра взрыва, были серьезно повреждены, а хранившийся

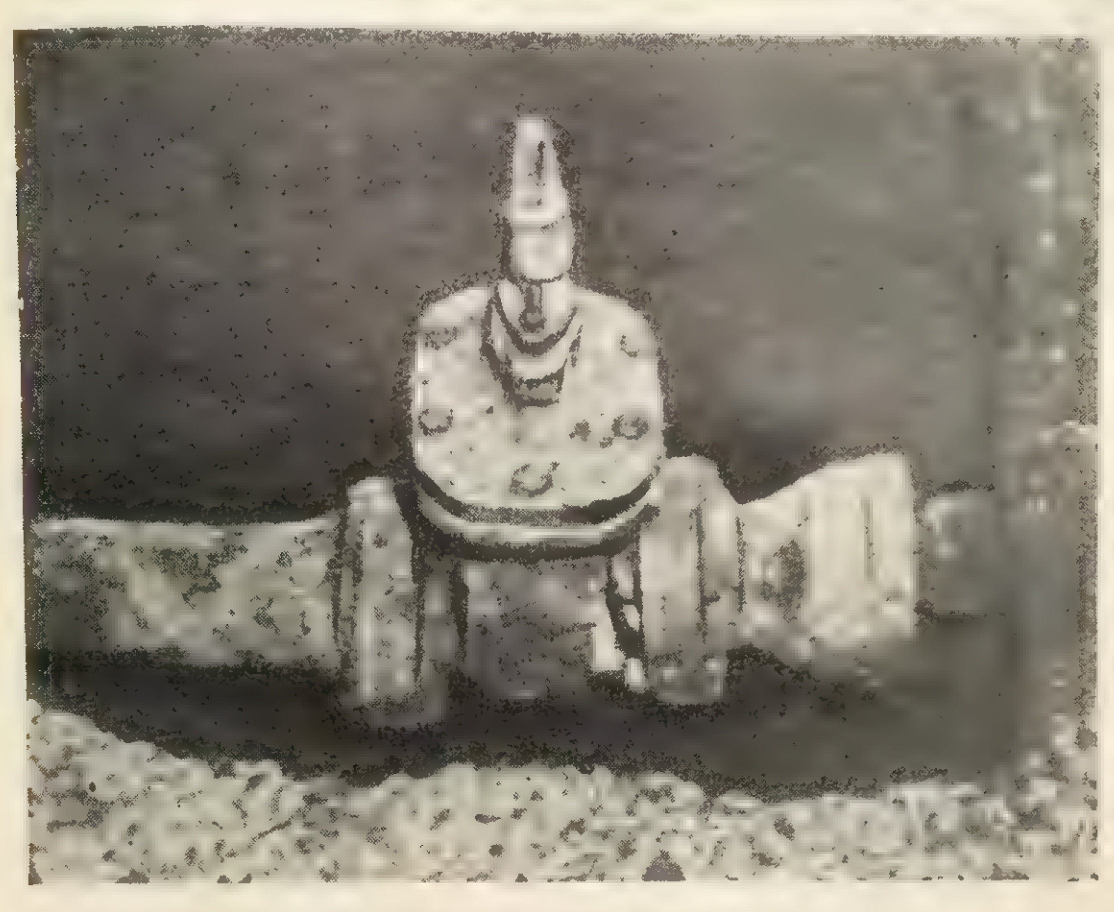


Рис. IV.113а. Четырехдюймовый запорный вентиль водопроводной магистрали, поврежденный при взрыве в Хиросима обломками кирпичной стены (0,34 *км* от эпицентра взрыва)

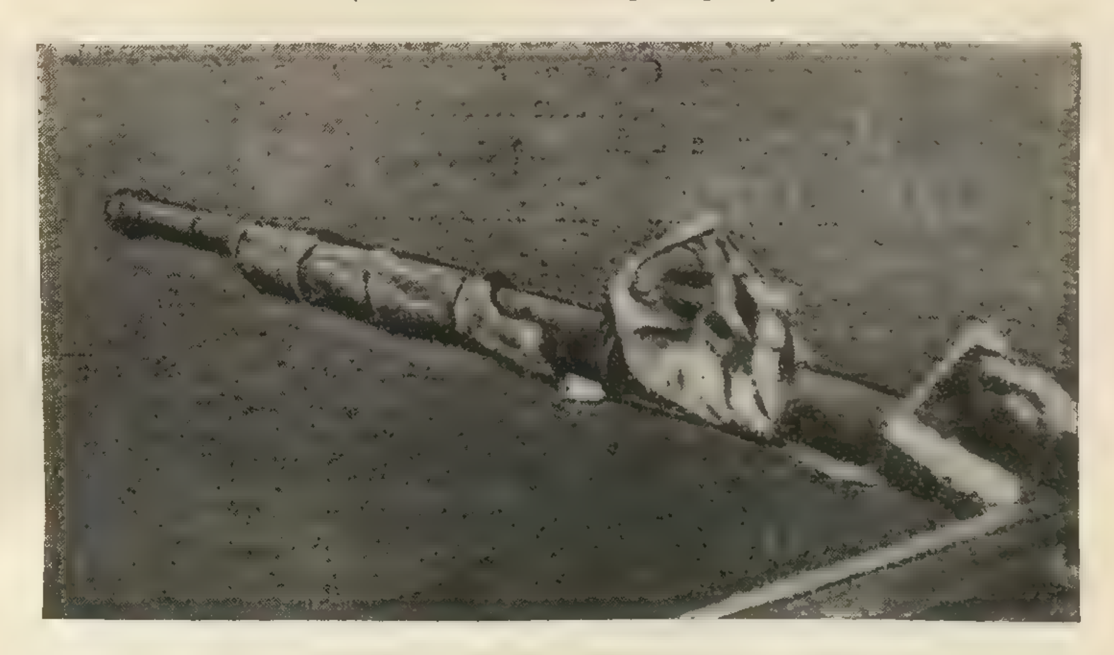


Рис. IV.113б. Повреждение 16-дюймовой водопроводной магистрали проложенной по мосту (Хиросима, 0,34 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. IV.115. Газгольдер, разрушенный в результате ядерного взрыва в Нагасаки (1 *км* от эпицентра взрыва)

в них газ загорелся. Однако взрывов газа не произошло (рис. IV.115). Подземные газовые магистрали от ядерного взрыва, по-видимому, не пострадали.

Установки для подачи природного и искусственного газа

IV.116. При испытаниях 1955 г., проведенных в штате Невада, производилось также определение характера возможных повреждений устройств, предназначенных для снабжения природным и искусственным газом. При этом предполагалось, в частности, собрать данные о действии ударной волны на важнейшие подземные устройства типовой газораспределительной системы.

IV.117. Были испытаны два типа участков газовой сети. Каждый из этих двух типов был представлен двумя одинаковыми участками сети. Одна система представляла собой обычную подземную транспортирующую и распределительную главную магистраль, состоящую из 6-дюймовых стальных и чугунных труб, проложенных на глубине 0,9 *м* с обычными вспомогательными устройствами.

6-дюймовые вентили газопроводов, снабженные защитными кожухами, были смонтированы в кирпичных или бетонных смотровых колодцах. 6-дюймовый регулятор низкого давления находился в подземной камере. Одна подземная газовая магистраль этого типа была проложена в зоне, где избыточное давление ударной волны составляло около 2,1 *кг/см*², а другая — в зоне с избыточным давлением 0,35 *кг/см*². Следует отметить, что при избыточном давлении 2 *кг/см*² полностью разрушаются все гражданские сооружения обычного типа.

IV.118. Вторая система представляла собой участок обычной распределительной сети, который включал в себя отрезок главного стального газопровода длиной 6 *м* с присоединенными к нему ответвлениями, доведенными до потребителей. Распределительные газопроводы состояли из стальных, медных и пластмассовых труб; эти газопроводы выводились на поверхность у стен домов-потребителей, где они присоединялись к редукторам и счетчикам и затем на высоте 0,6 *м* вводились в стену дома. Концы медных и пластмассовых труб заделывались в стене, чтобы в случае смещения стены с фундамента они были бы подвергнуты воздействию соответствующей нагрузки. Стальная труба также заделывалась внутри стены, но, кроме того, она присоединялась снаружи к трубе, которая на уровне земли была проложена с задней стороны дома, где присоединялась к внутренней системе труб. Это последнее соединение осуществлялось при помощи гибкой бесшовной бронзовой трубы, которая при помощи патрубка проходила через стену здания. В нескольких домах были установлены обычные газовые приборы; некоторые из них были присоединены к внутренним трубопроводам. Один из участков распределительной сети подвергался воздействию избыточного давления 0,35 *кг/см*² и другой — 0,12 *кг/см*².

IV.119. Ни одна из подземных газовых магистралей не пострадала существенно от ударной волны. В зоне, где избыточное давление составило 2,1 *кг/см*², был погнут 1,5-дюймовый вывод для измерения давления и сорваны маховик и крышка вентиля. В той же зоне чуть ниже поверхности земли были срезаны две 4-дюймовые вентиляционные трубы подземных регуляторных камер. В местах соединений труб и вентилей появилась незначительная утечка газа, вызванная, по всей вероятности, сотрясением в грунте, происшедшим в результате воздействия ударной волны.

IV.120. В зоне с избыточным давлением 0,12 *кг/см*², где не было серьезных повреждений домов, распределительная сеть как внутри, так и снаружи зданий не пострадала, не были повреждены также редукторы и газовые счетчики. В двухэтажном кирпичном доме, разрушенном вследствие воздействия избыточного давления, равного 0,35 *кг/см*² (см. § IV.30), трубы в подвале были смещены и погнуты вследствие обрушения первого этажа. Счетчик и регулятор давления не были повреждены, хотя сам счетчик был сорван со

своего места и упал на землю. Остальное оборудование газовой магистрали не пострадало.

IV.121. Газовые приборы, такие, как холодильники, плиты, комнатные камины, сушилки для одежды и водонагреватели, в результате взрыва получили умеренные повреждения, вызванные в основном разрушением зданий, в которых они были установлены. Наблюдалось смещение этих приборов со своих мест и нарушение их соединений с трубами. Однако даже в обрушившемся двухэтажном кирпичном здании опрокинутые холодильник и газовая плита, по-видимому, оставались в исправном состоянии, хотя и были погребены под обломками. Из этого можно сделать общий вывод, что бытовые газовые (так же, как и электрические) приборы, находящиеся в домах, не получивших тяжелых повреждений, будут оставаться в исправном состоянии.

IV.122. Судя по всему, мало что можно сделать для придания большей устойчивости системе газораспределения. Чтобы уменьшить утечку газа в связи с нарушением герметичности в местах соединений труб, вызываемым сотрясением грунта, можно рекомендовать усилить герметизацию этих мест и заменить уплотнительные материалы. Прокладывание распределительных газопроводов, а также установку вентилей, регуляторов и контрольных приборов целесообразно производить как можно глубже, чтобы свести к минимуму повреждения, вызываемые ударной волной и летящими предметами.

Установки со сжиженным нефтяным газом

IV.123. Во время испытаний 1955 г. было произведено определение устойчивости к действию ударной волны ядерного взрыва различных типов газораспределения от резервуаров со сжиженным нефтяным газом. Такие системы используются в пригородах, на отдельных фермах, на крупных складах, в промышленных и коммунальных предприятиях. Интересно было установить, в какой мере можно рассчитывать на использование сжиженного нефтяного газа в качестве топлива в условиях, создающихся после ядерного нападения.

IV.124. Испытывались два вида обычных бытовых или небольших промышленных газовых установок: 1) система, состоящая из двух стандартных взаимозаменяемых баллонов, содержащих 45 *кг* газа каждый, и 2) резервуар емкостью 1900 *л*, наполняемый из автоцистерн. Некоторые из этих резервуаров были установлены на открытой местности, другие были присоединены при помощи медных или стальных труб к внутренней газовой сети домов, подвергшихся при взрыве воздействию избыточного давления 0,35 *кг/см*^{2} и 0,12 *кг/см*^{2}. Некоторые газовые установки испытывались при из-

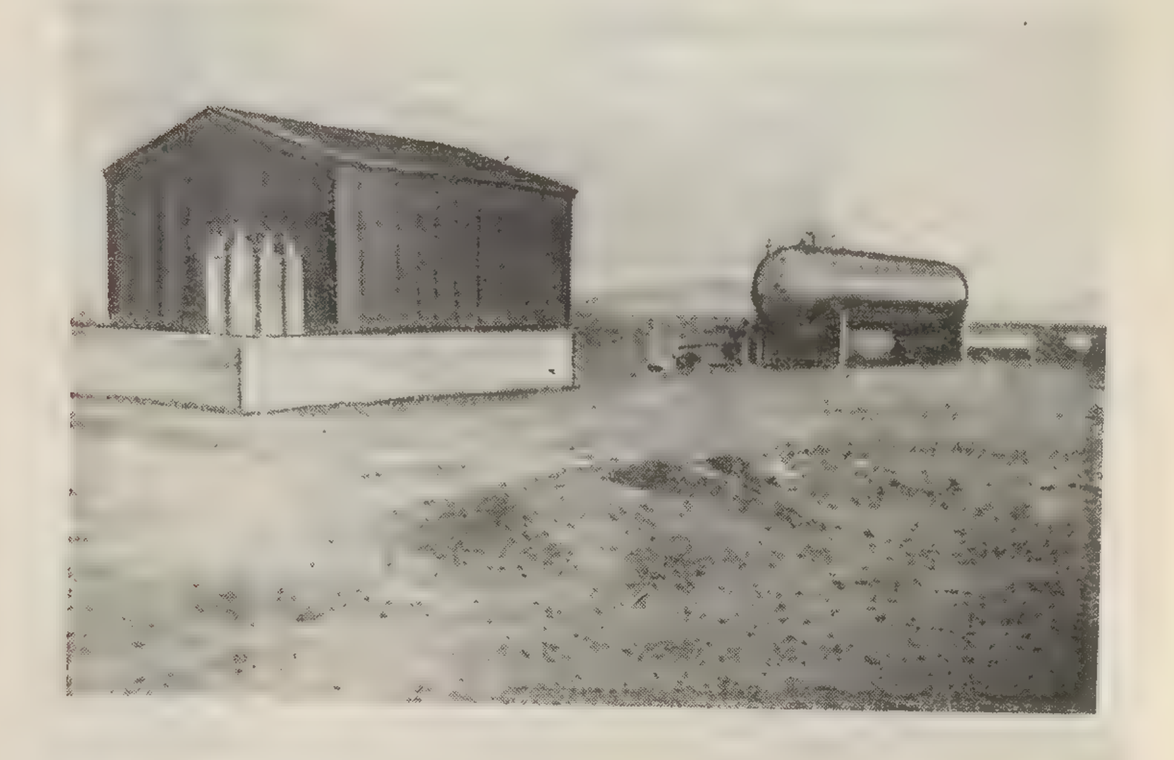
быточном давлении ударной волны 1,75 и 0,7 *кг/см²*. В этих случаях трубы от газовых контейнеров пропускались через бетонную стенку, имитировавшую стену дома.

IV.125. Кроме описанных выше устройств, в зоне с избыточным давлением 0,35 *кг/см²* было установлено хранилище сжиженного газа. Комплекс сооружений хранилища включал в себя резервуар емкостью 68 *м³*, в котором содержалось 58 360 *л* пропана, компрессор, помещение для наполнения баллонов, склад газовых баллонов. Кроме того, в хранилище имелись необходимые вспомогательные принадлежности (вентили, шланги и соединительные трубопроводы).

IV.126. При избыточном давлении 1,75 *кг/см²* сильнее всего пострадала установка со спаренными газовыми баллонами; при этом были сорваны регуляторы давления и отброшены в стороны газовые баллоны. Один из баллонов был отброшен на 600 *м*; этот баллон был сильно помят, однако его можно было использовать. При максимальном избыточном давлении 1,75 и 0,7 *кг/см²* соединения между отдельными элементами испытывавшихся газовых установок, как правило, нарушались, но обычно они могли быть вновь использованы. При избыточном давлении 0,35 *кг/см²* повреждения газовых баллонных установок в основном вызывались ударами летящих предметов и обломков, образовавшихся в результате повреждения тех домов, к которым они были присоединены. Детали этих установок, за исключением медных труб, в результате взрыва пострадали мало и оставались в исправном состоянии. При избыточном давлении 0,12 *кг/см²* баллоны со сжиженным газом не получили каких-либо повреждений и не были также смещены со своих мест. Только в одном из испытывавшихся баллонов возникла небольшая течь вследствие пробивания баллона, вызванного ударом острого предмета.

IV.127. Резервуары емкостью 1900 *л* оказались очень прочными и пострадали мало от взрыва. Резервуар, расположенный ближе всего к месту взрыва, под действием ударной волны был отброшен на 200 *м*, но, тем не менее, получил только наружные повреждения, которые не препятствовали его дальнейшему использованию. У этого резервуара был поврежден вентиль, используемый при наполнении, но благодаря наличию внутреннего запорного вентиля утечки газа при этом не произошло. Резервуар, подвергшийся избыточному давлению 0,7 *кг/см²*, был сдвинут на 1,5 *м*, но почти не пострадал. При давлении 0,35 и 0,12 *кг/см²* резервуары не были сдвинуты со своих мест и не пострадали (см. рис. IV.38).

IV.128. При избыточном давлении 0,35 *кг/см²* оборудование хранилища сжиженного газа емкостью 68 *м³* получило небольшие повреждения. Помещение для наполнения баллонов было разрушено полностью; весы для взвешивания баллонов были разбиты, трубопровод был разорван в месте его ввода в помещение (рис. IV.128).



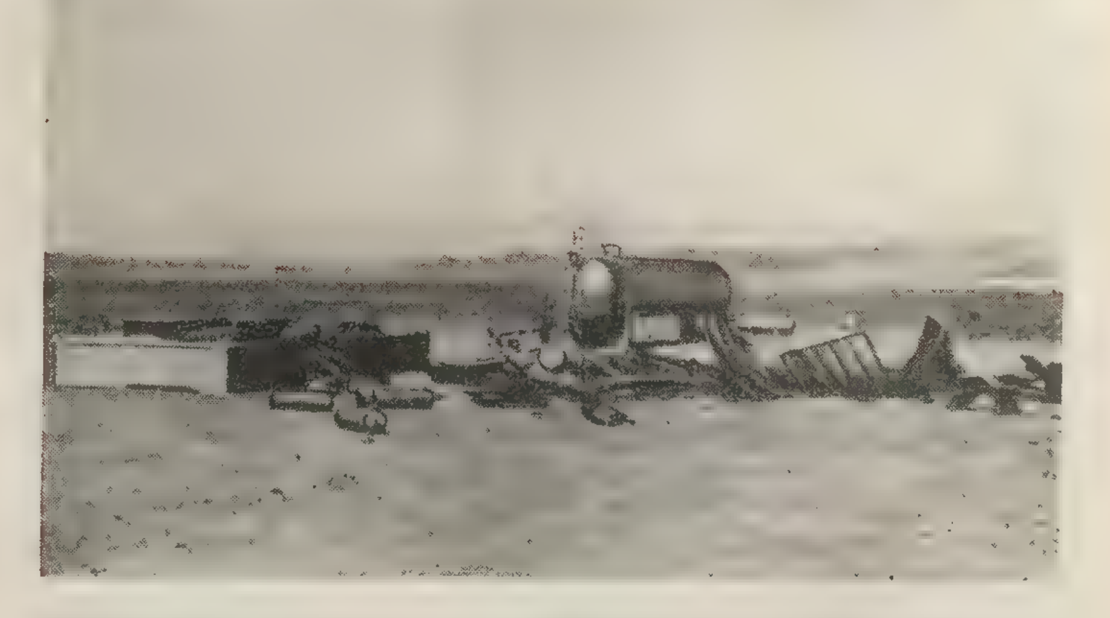


Рис. IV.128. Верхний фотоснимок — хранилище сжиженного нефтяного газа и оборудование для заправки перед ядерным взрывом. Нижний фотоснимок — эти же объекты после взрыва (избыточное давление 0,35 *кг/см²*)

Однако эти повреждения не вывели установку из рабочего состояния, так как основное оборудование находилось снаружи и существенно не пострадало. Все вентили и почти все трубопроводы установки остались целыми, и никакой утечки газа не произошло. Установку легко было бы вновь ввести в действие при условии восстановления силового агрегата. При отсутствии возможности запустить насос жидкий пропан мог поступать из резервуара самотеком.

IV.129. На основании результатов этих испытаний можно сделать вывод о том, что стандартное оборудование установок со сжиженным газом, за исключением медных трубопроводов, отличается высокой прочностью. Поэтому нарушения в подаче газа в результате ядерного нападения, по всей вероятности, будут носить местный и незначительный характер. В связи с этим сжиженный газ может оказаться очень полезным топливом в чрезвычайных условиях. Там, где сжиженный газ применяется в качестве топлива, снабжение газом при взрыве, по-видимому, не будет нарушено при условии, если сам дом не получит при этом сильных повреждений.

Оборудование связи

IV.130. Учитывая совершенно очевидную необходимость сохранения оборудования связи после ядерного нападения, в 1955 г. в штате Невада были испытаны следующие виды такого оборудования: подвижные системы и агрегаты радиосвязи, стандартный радиовещательный передатчик, антенные мачты, бытовые радиоприемники и телевизоры, телефонное оборудование (включая небольшой телефонный коммутатор), громкоговорители и сирены. Некоторые виды этого оборудования были установлены в зоне, где максимальное избыточное давление составляло 0,35 *кг/см²*; в зоне с избыточным давлением 0,12 *кг/см²* в большинстве случаев испытывалось по две однотипные установки. При избыточном давлении 0,12 *кг/см²* повреждения оборудования связи были столь незначительны, что о них не стоит и говорить. Радиусы зон повреждений оборудования связи зависят не только от избыточного давления, но также и от других факторов. Значения этих радиусов могут быть найдены из таблиц, приведенных в главе VI.

IV.131. В зоне действия избыточного давления 0,35 *кг/см²*, где испытанные типовые дома подвергались полному разрушению, оборудование связи оказалось довольно устойчивым к действию воздушной волны. Стандартные радиоприемники, телевизоры и подвижные радиостанции оставались после ядерного взрыва в рабочем состоянии, хотя и были покрыты обломками, а в некоторых случаях повреждены снаружи летящими предметами или сброшены

вниз с высоты нескольких футов. Ни вакуумные лампы, ни телевизионные трубки не были разбиты. Сильно пострадала только одна радиостанция, смонтированная на автомобиле, которая была раздавлена упавшей дымовой трубой.



Рис. IV.132. Разрушение легкой антенной мачты высотой 36 *м* (избыточное давление 0,35 *кг/см*²) при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т*

IV.132. Антенная мачта высотой 45 *м*, дополнительно закрепленная растяжками, осталась неповрежденной, другая антенная мачта высотой 36 *м*, более легкой конструкции, не имевшая растяжек, была сломана на высоте 12 *м* и упала на землю (рис. IV.132). Это было единственным серьезным повреждением испытывавшегося оборудования.

IV.133. Антенны радиостанций, находившиеся на мачтах, довольно хорошо выдержали воздействие ударной волны; была повреждена только антенна, установленная на мачте без растяжек, сломавшейся при взрыве. Антенны телевизоров вследствие их легкой конструкции пострадали в наибольшей степени. Некоторые из них были погнуты в результате действия ударной волны или вследствие обрушения зданий, на которых они были установлены. Поскольку при избыточном давлении 0,35 *кг/см²* здания обычно разрушались полностью, выход из строя телевизионных антенн на этих зданиях не имеет большого значения.

IV.134. Следует отметить, что во многих случаях телефонная связь и энергоснабжение оборудования связи осуществляются при помощи воздушных линий, поэтому при падении столбов, что иногда имело место (см. § IV.111), нарушается и работа связи. После необходимого ремонта оборудование связи снова удовлетворительно работало. Можно считать, что снабжение электроэнергией является наиболее слабым звеном в системе мероприятий по обеспечению работы средств связи.

Выводы

IV.135. В главе VI приводятся более подробные данные о соотношении между расстояниями от эпицентра ядерного взрыва и характером разрушений, вызываемых взрывами различной мощности, но можно пользоваться также упрощенными сводными данными, приведенными в табл. IV.135а и б. Данные этих таблиц относятся к так называемым типичным воздушным взрывам с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* и 1 млн. *т*. Эти данные были получены на основании результатов обследования районов взрывов в Японии, а также на основании результатов ядерных испытаний и произведенных расчетов. Поскольку здания, даже одного типа, всегда несколько различаются между собой по конструкции и качеству строительства, можно считать, что данные, приведенные в таблицах, относятся к средним сооружениям. Одни сооружения могут оказаться менее прочными, другие более прочными по сравнению со средними; это необходимо учитывать при использовании таблиц. Следует учитывать также и влияние высоты взрыва на характер разрушений. Для большей полноты данных таблицы в нее включены сведения о некоторых характерных свойствах ударных волн на различных расстояниях от эпицентра взрыва. Указанные в таблице величины скоростного напора относятся только к горизонтальной составляющей (см. § III.95).

Таблица IV.135а

Радиусы зон повреждений (разрушений), вызываемых типичным воздушным взрывом мощностью 20 тыс. *т*

Максимальная скорость движения воздушной среды, *м/сек*	Продолжительность положительной фазы, *сек*	Максимальный скоростной напор, *кг/см²*	Максимальное избыточное давление, *кг/см²*	Расстояние от эпицентра взрыва, *км*	Характер повреждений
				Более 4,2	Мелкие повреждения окон и дверей; средние повреждения штукатурки в зоне радиусом до 6,4 *км*; стекла могут быть выбиты на расстоянии до 14,5 *км*.
18	1,27	—	0,08	4,2	Легкие повреждения резервуаров для хранения жидкого топлива (заполненных).
26,8	1,11	—	0,12	3,2	Средние повреждения домов с деревянным каркасом.
31,3	1,06	0,006	0,14	2,9	Возгорание легковоспламеняемых материалов. Легкие повреждения радио- и телевизионных мачт; легкие повреждения фабричных труб.
38,4	1,00	0,01	0,17	2,6	Средние повреждения промышленных зданий с легким стальным каркасом и легкими стенами. Сильные повреждения домов с деревянным каркасом.
46,9	0,96	0,016	0,22	2,25	Легкие повреждения автотранспорта; средние повреждения мачт радио- и телевизионных передатчиков.
59,4	0,91	0,027	0,28	1,9	Средние повреждения промышленных зданий со стальным каркасом и легкими стенками. Значительные повреждения воздушных линий связи и электросетей. Разрушение домов с деревянными каркасами. Легкие повреждения шоссейных и железнодорожных мостов со сквозными фермами. Средние повреждения кирпичных домов с несущими стенами (многоквартирные дома).
68,4	0,85	0,05	0,38	1,6	Средние повреждения административных зданий со стальным каркасом и легкими стенами. Средние повреждения многоэтажных зданий с железобетонным каркасом и стенами.

Продолжение

Максимальная скорость движения воздушной среды, *м/сек*	Продолжительность положительной фазы, *сек*	Максимальный скоростной напор, *кг/см²*	Максимальное избыточное давление, *кг/см²*	Расстояние от эпицентра взрыва, *км*	Характер повреждений
104,6	0,78	0,085	0,53	1,29	Сильные повреждения многоквартирных кирпичных домов с несущими стенами. Средние повреждения зданий с железобетонным каркасом и легкими стенами; средние повреждения шоссейных и железнодорожных мостов. Сильные повреждения промышленных зданий со стальным каркасом средней прочности. Сильные повреждения многоэтажных сооружений с железобетонным каркасом и стенами.
131,4	0,71	0,15	0,7	0,97	Средние повреждения многоэтажных сооружений с массивными несущими стенами. Средние повреждения автотранспорта. Сильные повреждения административных зданий со стальным каркасом и легкими стенами. Сильные повреждения резервуаров для хранения жидкого топлива (заполненных).
170,6	0,64	0,24	0,98	0,64	Сильные повреждения автотранспорта. Средние повреждения железобетонных взрывоустойчивых сооружений без окон. Сильные повреждения или разрушение всех других (наземных) сооружений.
136,7	0,55	0,17	1,68	0,32	
				0	Эпицентр воздушного взрыва мощностью 20 тыс. *т*.

Таблица IV.135б

Радиусы зон повреждений (разрушений), вызываемых типичным воздушным взрывом мощностью 1 млн. *т*

Максимальная скорость воздушной среды, *м/сек*	Продолжительность положительной фазы, *сек*	Максимальный скоростной напор, *кг/см*²	Максимальное избыточное давление, *кг/см*²	Расстояние до эпицентра взрыва, *км*	Характер повреждений
				Более 16	Легкие повреждения окон и дверей, средние повреждения штукатурки в зоне радиусом до 24 *км*; стекла могут быть выбиты на расстоянии до 48 *км*.
16	4,8	—	0,07	16,1	Легкие повреждения резервуаров для хранения жидкого топлива (наполненных).
19	4,6	—	0,08	14,5	Возгорание жидкого топлива.
23,7	4,3	—	0,10	12,3	Средние повреждения домов с деревянным каркасом.
28,2	4,0	0,0056	0,13	11,3	Легкие повреждения радио- и телевизионных мачт.
37	3,8	0,009	0,17	9,7	Легкие повреждения фабричных труб. Средние повреждения промышленных зданий с легким стальным каркасом и легкими стенами.
44,7	3,5	0,018	0,22	8	Легкие повреждения автотранспорта. Средние повреждения радио- и телевизионных мачт. Сильные повреждения домов с деревянным каркасом. Средние повреждения промышленных зданий со стальным каркасом средней прочности и легкими стенами. Значительные повреждения воздушных линий связи и электросетей.
63,5	3,2	0,039	0,33	6,4	Легкие повреждения шоссейных и железнодорожных мостов со сквозными фермами. Средние повреждения административных зданий со стальным каркасом и легкими стенами. Разрушение домов с деревянным каркасом. Средние повреждения многоквартирных кирпичных домов с несущими стенами.

Продолжение

Максимальная скорость воздушной среды, *м/сек*	Продолжительность положительной фазы, *сек*	Максимальный скоростной напор, *кг/см²*	Максимальное избыточное давление, *кг/см²*	Расстояние до эпицентра взрыва, *км*	Характер повреждений
101,9	2,9	0,084	0,52	4,8	Средние повреждения многоэтажных сооружений с железобетонным каркасом и стенами. Сильные повреждения многоквартирных кирпичных домов с несущими стенами. Средние повреждения домов с железобетонным каркасом и легкими стенами. Средние повреждения шоссейных и железнодорожных мостов со сквозными фермами. Сильные повреждения промышленных зданий со стальным каркасом средней прочности и легкими стенами.
					Сильные повреждения многоэтажных зданий с железобетонным каркасом и стенами. Средние повреждения многоэтажных зданий (сооружений) с массивными несущими стенами. Сильные повреждения административных зданий со стальным каркасом и легкими стенами.
141,7	2,6	0,18	0,77	3,2	Средние повреждения автотранспорта. Сильные повреждения резервуаров для хранения жидкого топлива (заполненных).
153	2,1	0.22	1,4	1,6	Сильные повреждения автотранспорта. Средние повреждения взрывоустойчивых железобетонных сооружений без окон. Сильные повреждения или разрушение всех других наземных сооружений.
				0	Эпицентр воздушного взрыва мощностью 1 млн. *т*.

ГЛАВА V

ДЕЙСТВИЕ НАЗЕМНЫХ, ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНОГО ВЗРЫВА

Воздушная ударная волна

V.1. В данной главе будут рассмотрены некоторые из эффектов, сопровождающих ядерные взрывы, произведенные на поверхности (или вблизи поверхности) земли, под землей и под водой, в частности, будут освещены вопросы, связанные с действием волны сжатия (ударной волны), образовавшейся в результате быстрого расширения чрезвычайно горячих и сильно сжатых газов в огненном шаре (см. главу II).

V.2. Сначала будет рассмотрен случай наземного взрыва, т. е. взрыва, происходящего на самой поверхности земли (контактный взрыв) или на некоторой высоте, равной или меньшей такой высоты, при которой огненный шар (в период максимальной его яркости) касается земли. Хотя некоторая доля энергии такого взрыва, как это будет показано ниже, расходуется на образование воронки, значительная часть ее выделяется в виде воздушной ударной волны. Так как взрыв происходит близко от поверхности, слияние прямой и отраженной ударных волн происходит вблизи эпицентра. Действительно, как показано в главе III, в случае контактного взрыва, когда ядерный заряд взрывается на поверхности земли, падающая и отраженная волны немедленно сливаются, образуя, как показано на рис. III.29, полусферический фронт головной ударной волны.

V.3. Характерные параметры воздушной ударной волны, сопровождающей эталонный наземный взрыв (наземный взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*), изменяющиеся в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва, были даны в конце главы II. Отмеченный там закон подобия может быть использован для определения параметров воздушной ударной волны при наземном взрыве любой мощности.

Образование воронки

V.4. В главе II было упомянуто, что при наземном взрыве значительное количество грунтового материала испаряется вследствие чрезвычайно высокой температуры. Этот материал увлекается восходящими потоками воздуха, возникающими при подъеме огненного шара, и в конечном счете конденсируется в атомном облаке. Что касается воронки, то основным фактором, определяющим ее образование, является перемещение грунта под действием

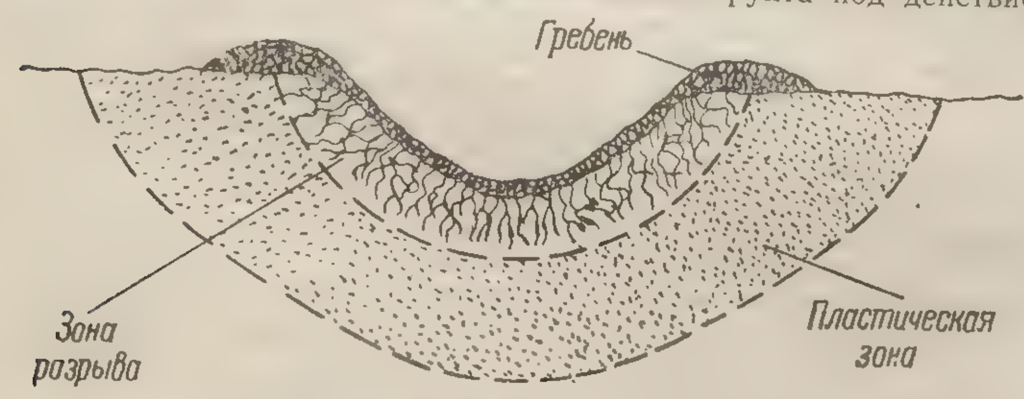


Рис. V.5. Образование воронки при наземном ядерном взрыве

давления, обусловленного быстрым расширением раскаленного газового пузыря. Удаление грунтового материала из воронки происходит путем его сдвигания, выброса и испарения. Вследствие того, что расширяющиеся газы устремляются от центра наружу во всех направлениях, лишь небольшое количество грунта падает обратно в воронку, хотя значительное количество его оседает по краям воронки, образуя верхние слои гребня.

V.5. Если предположить для простоты, что взрыв был произведен на местности с сухим грунтом, то под воронкой можно выделить две более или менее заметно выделяющиеся зоны. Во-первых, имеется **зона разрыва.** В этой зоне в грунте образуется бесчисленное количество трещин различных размеров. Ниже расположена **пластическая зона.** В этой зоне видимых трещин не имеется, но грунт подвергается деформации. Пластическая деформация и сдвиг грунта по краям воронки способствуют образованию вокруг воронки гребня (рис. V.5).

Образование воронки при наземном взрыве

V.6. Толщина слоя грунта в зоне разрыва и пластической зоне зависит от вида грунта, а также от мощности и высоты взрыва. Если грунт представляет собой скалистые породы, то образуется зона разрыва, слой же грунта пластической зоны будет в этом случае очень тонким или даже этой зоны вообще не будет. Под землей

действие наземного взрыва не распространяется заметно за пределы зоны разрыва, радиус которой составляет примерно полтора радиуса воронки. Исключение составляют случаи повреждения подземных сооружений легкого типа, а также канализационных и водопроводных сетей.

Размеры воронки

V.7. Подсчитано, что при контактном наземном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* диаметр воронки в сухом грунте будет составлять примерно 38 *м*; кроме того, вокруг воронки примерно еще на 18 *м* будет простираться гребень. Глубина воронки достигает около 7,5 *м*. В твердых скалистых породах (гранит, песчаник) размеры воронки будут меньше.

В грунте, насыщенном водой, диаметр и первоначальная глубина воронки, с образованием которой связаны повреждения сооружений, будут заметно больше. Однако конечная глубина воронки будет меньше вследствие **гидравлического заполнения**, т. е. сползания обратно в воронку увлажненного грунта и просачивания воды, несущей частицы грунта.

V.8. Диаметр (или радиус) воронки увеличивается примерно пропорционально кубическому корню из тротилового эквивалента. Следовательно, в случае взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в W тыс. *т* диаметр воронки будет в $W^{1/3}$ раза превышать указанный выше диаметр воронки, образующейся при взрыве заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*. Глубина воронки для большинства видов грунта изменяется пропорционально корню четвертой степени из тротилового эквивалента.

Например, в случае контактного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т*, произведенного на местности с сухим грунтом, можно ожидать, что диаметр воронки составит $38 \times 100^{1/3} = 176$ *м*, а глубина — $7{,}5 \times 100^{1/4} = 24$ *м*. График, показывающий изменение диаметра и глубины воронки в зависимости от тротилового эквивалента для контактного взрыва на местности с сухим грунтом, вместе с поправочными коэффициентами, учитывающими другие виды грунтов, дан в конце настоящей главы (см. рис. V.46).

V.9. Приведенные выше данные относятся к взрыву на поверхности земли. Если высота взрыва увеличивается, то размеры воронки уменьшаются по довольно сложной зависимости. В целом эта зависимость характеризуется тем, что как радиус, так и особенно глубина воронки быстро уменьшаются с увеличением высоты взрыва. Даже если высота взрыва существенно меньше того значения, при котором огненный шар касается земли, воронка имеет незначительные размеры. Воронка значительных размеров образуется в том случае, если высота взрыва не превышает одной десятой части радиуса огненного шара.

Волна сжатия в грунте

V.10. При наземном ядерном взрыве незначительная доля энергии взрыва расходуется на образование волны сжатия в грунте. В настоящее время изучены только самые общие свойства этой волны. Волна сжатия в грунте отличается от ударной волны в воздухе гораздо менее резким увеличением давления во фронте волны, а также более медленным его ослаблением за фронтом. Вблизи места взрыва градиент давления или сжатия достаточен для преодоления сил сцепления грунта. Величина давления во фронте волны сжатия уменьшается довольно быстро с удалением от места взрыва, и на больших расстояниях волна сжатия становится подобной акустической или сейсмической волне.

V.11. Действие волны сжатия подобно действию землетрясения средней интенсивности, хотя, как указано в § II.69, имеются существенные различия между подземным ядерным взрывом и землетрясением. В случае ядерного взрыва давление в волне сжатия падает с увеличением расстояния быстрее. Радиус зоны повреждений при наземном взрыве, вызванных волной сжатия, невелик по сравнению с радиусом зоны повреждений, вызванных воздушной ударной волной.

V.12. Распространение волн сжатия в грунте — явление довольно сложное, но общие закономерности этого явления могут быть коротко сформулированы следующим образом: на поверхности земли от центра взрыва распространяются волны подобно волнам, распространяющимся в воде. Эти грунтовые поверхностные волны, распространяясь от центра, производят сейсмический эффект, который ощущается в любой данной точке как колебание поверхности. В дополнение к этому импульс давления от расширяющегося газового пузыря, распространяющийся с почти полусферическим, постепенно увеличивающимся в размерах фронтом ударной волны, образует волны сжатия и сдвига под поверхностью земли.

V.13. Действие волны сжатия на подземные сооружения отличается по своему характеру от действия воздушной ударной волны на сооружения, находящиеся на поверхности земли. В последнем случае, как было указано в главе III, сооружение испытывает нечто подобное внезапному удару, за которым следует скоростной напор массы воздуха, движущейся за фронтом ударной волны. Иная картина получается при воздействии волны сжатия. Благодаря тому, что среда, через которую проходит волна сжатия, имеет примерно такую же плотность, что и само подземное сооружение, реакции грунта и сооружений тесно связаны между собой. Другими словами, движение (ускорение, скорость и перемещение) подземного сооружения под действием волны сжатия в значительной мере обусловливается движением самого грунта. Этот факт оказывает важное влияние на масштаб разрушений, вызываемых наземным и подземным взрывами.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДЗЕМНОГО ВЗРЫВА

Воздушная ударная волна

V.14. Подземным взрывом называется взрыв, произведенный ниже поверхности земли (см. § I.29). Однако при решении практических вопросов нужно иметь в виду, что осуществление подземных ядерных взрывов на глубине более 15—30 *м* маловероятно. Это означает, что целесообразно рассмотреть только такие подземные ядерные взрывы, при которых огненный шар прорывается через поверхность земли. Взрыв такого рода будет иметь, очевидно, много общего с наземным взрывом.

V.15. Доля энергии взрыва бомбы, расходуемая на образование воздушной ударной волны, будет зависеть от ряда обстоятельств и прежде всего от глубины взрыва. Если взрыв производится под землей на глубине нескольких футов, распределение энергии будет почти таким же, как при наземном контактном взрыве. По мере увеличения глубины взрыва энергия воздушной ударной волны будет снижаться, а уменьшение максимального избыточного давления с увеличением расстояния от центра взрыва будет происходить более быстро. Следовательно, избыточное давление ударной волны на заданном расстоянии от точки взрыва будет меньше для взрывов, происходящих на большей глубине.

Образование воронки и волна сжатия

V.16. Размеры воронки, образующейся при неглубоком подземном взрыве, будут по существу такими же, как и в случае контактного взрыва, рассмотренного выше. С увеличением глубины взрыва все меньшая доля его энергии будет расходоваться на образование ударной волны и, наоборот, все большая доля энергии будет идти на образование волны сжатия и воронки. Следовательно, с возрастанием глубины взрыва до определенного ее значения диаметр и радиус воронки увеличиваются. Дополнительные сведения по этому вопросу будут даны в специальном разделе этой главы (см. рис. V.46).

V.17. Волна сжатия подземного взрыва совершенно аналогична волне сжатия, образующейся при наземных взрывах. Доля энергии, расходуемая на образование волны сжатия, в этом случае неизвестна, но она будет увеличиваться до определенного значения с увеличением глубины взрыва.

КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ

Наземные взрывы

V.18. В случае наземного взрыва на небольшой высоте над поверхностью земли воронка не будет очень глубокой. Незначительно заглубленные сооружения вблизи эпицентра взрыва будут повреж-

дены, однако сооружения на больших глубинах вряд ли будут затронуты. Как было указано в § V.6, уже на удалении полутора радиусов воронки от эпицентра взрыва подземные сооружения и различные трубопроводы, вероятно, не получат существенных повреждений. Что же касается сооружений на поверхности земли, то радиус зоны разрушения для них будет зависеть от характеристик воздушной ударной волны так же, как и при воздушном взрыве (см. гл. III). Площадь зоны разрушений, вызванных воздушной ударной волной, будет значительно больше площади зоны разрушений, вызванных движением грунта (или, другими словами, волной сжатия). В случае контактного взрыва или взрыва вблизи поверхности земли положение будет сходно с положением при подземном взрыве, как это указано ниже.

Подземные взрывы

V.19. Критерии разрушений, вызванных подземным и контактным взрывами, определить трудно, особенно в отношении подземных сооружений. Простым и практически удобным подходом является деление района вокруг эпицентра взрыва на три области. Первая область охватывает непосредственно воронку. В пределах этой области происходит практически полное разрушение всех сооружений как на поверхности земли, так и под землей.

V.20. Вторая область простирается примерно до конца пластической зоны, т. е. на расстояние, на котором происходит перемещение грунта (см. рис. V.5). В некоторых грунтах радиусы этой области могут составлять примерно 2,5 радиуса самой воронки. В пределах этой области прочные и удачно сконструированные подземные сооружения будут, вероятно, только в весьма слабой степени затронуты действием воздушной ударной волны, разрушения вызываются действием волны сжатия и перемещением грунта. Действительный механизм разрушения в этом случае зависит от нескольких более или менее независимых факторов, таких, как размер, форма и упругость сооружения, его ориентация относительно центра взрыва, характеристики грунта. Некоторые из этих факторов будут рассмотрены более подробно в главе VI.

V.21. Наряду с подземными сооружениями можно упомянуть также о находящихся под землей различных трубопроводах, тоннелях и сооружениях метро. Повреждения длинных трубопроводов происходят главным образом в местах соединения составляющих их труб, а также в местах вводов трубопроводов в здания. Эти повреждения происходят в результате различного смещения отдельных элементов трубопровода. Вероятность повреждений увеличивается, если трубы изготовлены из хрупких материалов и если трубопроводы наглухо прикреплены к зданию. Хотя тоннели и соору-

жения метро, находящиеся в зоне образования воронки, будут, вероятно, разрушены, а находящиеся в пластической зоне получат определенные повреждения, эти сооружения хорошо противостоят волне сжатия, особенно если они построены в твердых скальных породах и их поверхности закреплены обделкой.

V.22. В третьей области, за пределами пластической зоны, волна сжатия оказывает относительно слабое действие; в этом случае важнейшим критерием разрушения сооружений становится нагрузка от воздушной ударной волны. Прочные или находящиеся на большой глубине сооружения не получат существенных повреждений, а степень повреждений сооружений средней прочности, сооружений недостаточно заглубленных и различных подземных коммуникаций будет определяться в основном величиной максимального избыточного давления воздушной ударной волны как при наземном, так и при подземном взрыве. Сооружения на поверхности земли, частично заглубленные в грунт, будут, конечно, непосредственно подвергнуты воздействию воздушной ударной волны.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

Ударная волна подводного взрыва

V.23. Результатом быстрого расширения газового пузыря, образующегося при ядерном взрыве под водой, является возникновение ударной волны, распространяющейся в воде во всех направлениях. В основном эта ударная волна подобна воздушной ударной волне, но отличается от последней некоторыми деталями. Так же, как и в воздухе, во фронте ударной волны, распространяющейся в воде, быстро увеличивается избыточное давление. Однако в воде максимальное избыточное давление падает с увеличением расстояния не так быстро, как это имеет место в воздухе. Следовательно, на одних и тех же расстояниях максимальные величины давления в воде значительно больше соответствующих значений давления для взрывов равной мощности в воздухе. Например, максимальное избыточное давление на расстоянии 900 *м* от центра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т* в глубоком водоеме составляет 190 $кг/см^2$. В то же время давление при воздушном взрыве (при прочих равных условиях) составляет менее 1 $кг/см^2$.

С другой стороны, продолжительность действия ударной волны в воде меньше, чем в воздухе. В воде эта продолжительность составляет несколько сотых долей секунды, тогда как в воздухе она равна примерно 1 *сек.*

V.24. Скорость звука в воде при нормальных условиях составляет примерно 1,6 *км/сек*, то есть почти в пять раз превышает скорость звука в воздухе. Если максимальное давление велико, то скорость ударной волны превышает нормальную скорость звука. При

падении избыточного давления скорость движения фронта ударной волны снижается и в конечном итоге приближается к скорости звука так же, как и в случае взрыва в воздухе.

V.25. Если ударная волна при своем распространении под водой встречает какие-либо поверхности, например корпус корабля или морское дно, то происходит отражение волны, как и в воздухе. Прямая и отраженная волны могут так же при определенных условиях слиться и образовать фронт ударной волны с повышенным

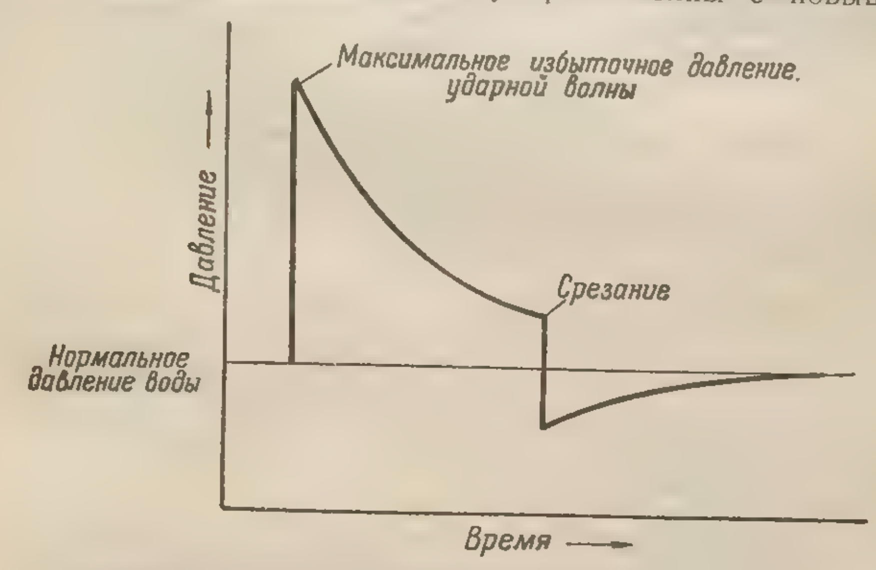


Рис. V.27. Изменение давления воды во времени при подводном ядерном взрыве в фиксированной точке, находящейся вблизи поверхности воды

давлением. Однако, когда ударная волна в воде достигает верхней (воздушной) поверхности, явление отражения протекает совершенно иным образом.

V.26. На границе между водой и воздухом ударная волна, распространяющаяся в воде, встречает значительно менее плотную среду — воздух. В результате этого в воде будет распространяться отраженная волна, но это будет уже волна разрежения. В результате соединения отраженной волны разрежения и прямой волны происходит резкое уменьшение давления ударной волны в воде. Это явление называют **поверхностным срезанием**, или просто **срезанием.**

V.27. Изменение в данном месте избыточного давления во времени после подводного ядерного взрыва в некоторой фиксированной точке, расположенной недалеко от поверхности воды, показано на рис. V.27. Избыточное давление в данном месте по истечении короткого интервала времени после взрыва (необходимого для того, чтобы ударная волна, распространяющаяся от центра взрыва, достигла этого места) резко возрастает в момент прихода

фронта ударной волны. Затем в течение некоторого периода времени давление постепенно уменьшается (как и в воздухе); вслед за этим отраженная волна разрежения вызывает резкое падение давления, которое может даже стать меньше нормального (гидростатического) давления воды. Эта фаза отрицательного давления кратковременна.

V.28. Интервал времени между моментом прибытия в данную точку (или цель) прямой ударной волны и моментом срезания, соответствующим приходу отраженной волны, зависит от глубины взрыва, глубины расположения цели и расстояния от цели до

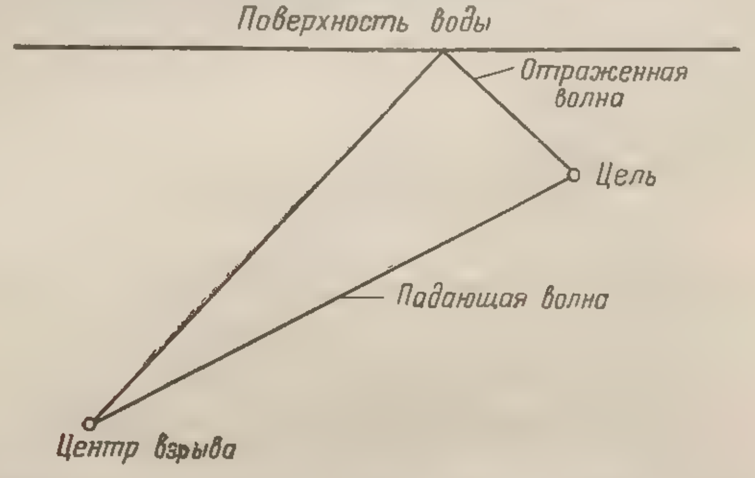


Рис. V.28. Распространение падающей и отраженной волн по направлению к подводной цели

центра взрыва. Как видно из рис. V.28, эти три расстояния будут определять длину пути, проходимого прямой и отраженной ударными волнами до встречи с целью. Если подводная цель находится близко к поверхности, как, например, дно корабля, то промежуток времени между приходом фронтов упомянутых выше ударных волн будет мал, и срезание последует вскоре за достижением цели фронтом прямой ударной волны. В результате этого повреждения, получаемые объектом, могут быть уменьшены.

Повреждения, вызываемые подводной ударной волной

V.29. Действие ударной волны на корабль или такие сооружения, как волнорез или дамба, представляет собой внезапный удар. Аналогичному воздействию сооружения подвергаются при подводных взрывах зарядов тринитротолуола и других химических взрывчатых веществ. Однако если в последнем случае удар локализован, то при ядерном взрыве действие удара охватывает большую площадь, например весь корабль испытывает его почти мгновенно.

V.30. Следует ожидать, что действие подводного ядерного

взрыва на корабль может быть двух родов: во-первых, непосредственное действие ударной волны на корпус корабля и, во-вторых, косвенное действие, обусловленное перемещением отдельных частей оборудования внутри корабля, вызванным ударной волной.

Действие подводной ударной волны на корпус корабля может привести к серьезной деформации корпуса ниже ватерлинии и разрыву листов наружной его обшивки и вызвать, таким образом, течь, а также подвергнуть сильному напряжению остов корабля. Подводная ударная волна вызывает также и быстрое перемещение корабля как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Это перемещение является причиной повреждения его частей и оборудования внутри корпуса.

V.31. Внутри корпуса корабля особенно чувствительными к удару являются основные питающие линии, магистральные паропроводы, валы и кирпичная кладка котлов. В результате действия сил инерции опорные элементы или фундаменты тяжелого оборудования, например двигателей и котлов, вероятно, будут разрушены или деформированы. Более легкие или недостаточно закрепленные элементы оборудования будут разбрасываться с большой силой, повреждаясь сами и разрушая переборки и другое оборудование. Оборудование с прочным креплением, рассчитанным на действие удара, вероятно, не получит столь серьезных повреждений.

V.32. Повреждение обшивки корабля зависит главным образом от величины максимального давления подводной ударной волны. То же самое, вероятно, справедливо в отношении шлюзовых ворот на каналах и кессонов сухих доков. Можно ожидать, что при очень высоких давлениях во фронте ударной волны такие сооружения будут серьезно повреждены. С другой стороны, степень разрушения крупных и прочных подводных сооружений, таких, как портовые сооружения, в большей степени зависит от величины импульса ударной волны. Величина импульса в свою очередь зависит от длительности действия ударной волны, а также от величины ее давления.

Разрушающее действие подводного взрыва

(Эксперимент у атолла Бикини)

V.33. Во время проведения неглубокого подводного взрыва у атолла Бикини (испытание «Бейкер») в июле 1946 г. (см. гл. II) в районе взрыва на якорь было поставлено около 70 кораблей различных типов. Хотя взрыв сопровождался воздушной ударной волной значительной энергии, основные повреждения корабли, находившиеся в лагуне, получили от действия ударной волны, распространявшейся в воде. Ниже в общих чертах излагаются некоторые общие выводы, полученные в результате изучения последствий взрыва. Следует заметить, однако, что характер и размер повреж-

дений, которые надводные корабли получат от действия подводной ударной волны, будут зависеть от глубины взрыва ядерного заряда, типа корабля, ориентации корабля по отношению к центру взрыва, а также от того, двигается ли корабль или стоит на якоре.

V.34. При неглубоких подводных взрывах, подобных взрыву, произведенному при испытании «Бейкер», максимальное избыточное давление ударной волны в воде, при котором происходит потопление кораблей всех типов достаточно прочной конструкции, составляет, вероятно, около 210—280 *кг/см²*.

Следует ожидать, что некоторые корабли будут потоплены при избыточном давлении порядка 140 *кг/см²*, те же корабли, которые при таком давлении останутся на плаву, получат повреждения, исключающие какую-либо возможность их восстановления. Бóльшая часть кораблей в результате воздействия максимального избыточного давления до 70 *кг/см²* не будет способна двигаться. При меньших давлениях оборудование корабля получит более значительные повреждения, чем обшивка корпуса.

V.35. Вследствие быстрого смещения, вызванного действием подводной ударной волны при неглубоком подводном взрыве, котлы и главные двигатели корабля в зоне, где избыточное давление подводной ударной волны составляет около 175 *кг/см²*, получат тяжелые повреждения. В зоне, где давление достигает 140 *кг/см²*, будут получены средние повреждения; легкие повреждения котлы и главные двигатели могут получить за пределами зоны с избыточным давлением в 70 *кг/см²*. Вспомогательные механизмы, связанные с главными двигателями, не пострадают в сильной степени, однако легкое внутреннее оборудование корабля будет повреждено в зоне с избыточным давлением подводной ударной волны до 35 *кг/см²*. Двигатели кораблей, находящихся в движении, будут повреждены в большей степени, чем двигатели кораблей, стоящих на якоре.

Воздушная ударная волна при подводном взрыве

V.36. Хотя основная часть энергии ударного действия, освобождающейся при неглубоком подводном взрыве, проявляется в виде подводной ударной волны, значительное количество энергии проходит через поверхность в виде воздушной ударной волны (см. § V.15). Воздушная ударная волна, несомненно, причинила некоторый ущерб палубным надстройкам кораблей во время испытания «Бейкер». Однако этот ущерб был незначительным по сравнению с ущербом, нанесенным подводной ударной волной. Если бы ядерный заряд был взорван недалеко от берега, то основное поражающее действие воздушной ударной волны, по-видимому, проявилось бы на объектах, расположенных на суше. В этом случае критерии повреждений будут те же самые, что и для воздушного взрыва, произведенного над поверхностью земли при соответствующих избыточном давлении и скоростном напоре.

Волны при подводном взрыве

V.37. Явление образования волн на воде при испытании «Бейкер» было отмечено в главе II. Некоторые дополнительные данные, в особенности относительно разрушающего действия этих волн,



Рис. V.37. Волны от подводного ядерного взрыва, достигшие побережья на расстоянии 17,6 *км* от эпицентра взрыва (испытание „Бейкер")

будут приведены ниже. Первая волна, которая образовалась после подводного взрыва, состояла из гребня и образовавшейся вслед за ним впадины, глубина которой была равна высоте гребня. Вслед за первой волной образовались другие волны, число которых росло по мере удаления системы этих волн от центра взрыва. Вид таких волн у отмели, расположенной на удалении 17,6 *км* от центра взрыва, показан на рис. V.37.

V.38. Наблюдением было установлено, что первая волна отличалась от последующих. Это была одиночная длинная волна,

возникшая непосредственно в момент взрыва и получившая свою первоначальную энергию от быстрого движения масс воды, вызванного расширением газового пузыря.

Последующие волны образовались, вероятно, в результате прорыва газового пузыря и заполнения пустоты, образовавшейся в воде.

V.39. Вблизи места взрыва первый гребень имел несколько большую высоту, чем последующие, как относительно уровня спокойной воды, так и относительно сопровождающей этот гребень впадины. На определенном удалении от центра взрыва самой высокой волной оказывалась одна из последующих волн; в дальнейшем с увеличением расстояния от места взрыва более поздние волны становились наибольшими по высоте.

V.40. Значения максимальных высот волн на различных расстояниях от эпицентра взрыва и отрезки времени, за которые эти волны проходят указанные расстояния при неглубоком подводном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*, приведены в табл. V.40. Эти результаты основываются на наблюдениях, проведенных во время испытания «Бейкер» у атолла Бикини. Теоретические вопросы, связанные с образованием волн при неглубоких подводных взрывах с любым заданным тротиловым эквивалентом, будут рассматриваться ниже в этой главе.

Таблица V.40

Значения максимальных высот волн (от гребня до дна впадины) и отрезки времени, за которые эти волны прошли определенные расстояния (испытание «Бейкер» у атолла Бикини)

Расстояние, *м*	300	600	1200	1825	2450	3000	3650
Высота волны, *м*	28,6	14,3	7,3	4,85	3,94	3,34	2,74
Время, *сек*	11	23	48	74	101	127	154

V.41. Следует считать вероятным, что некоторые повреждения кораблей во время испытания «Бейкер» явились результатом воздействия больших волн. Довольно определенным доказательством того, что некоторые повреждения авианосца «Саратога», стоявшего на якоре на расстоянии 360 *м* от эпицентра взрыва (от его кормы), были получены в результате возникновения этих волн, являются фотоснимки, полученные фотографированием с интервалом в 3 сек. Фотографированием до того момента, когда на корабле стало заметно действие ударной волны, установлено, что сооружения командного мостика и радиолокационная мачта еще не повреждены. Из фотоснимка, полученного при фотографировании через 9 сек. после этого, видно, что радиолокационная мачта согнута ударной волной, но сооружения командного мостика не повреждены. Из этого фотоснимка видно, что корма корабля поднялась на гребень пер-

вой волны по крайней мере на высоту 13 *м* по сравнению с первоначальным ее положением. Однако вскоре после этого корабль был накрыт базисной волной.

V.42. Когда сильное волнение утихло и взрыв в основном прекратил свое действие, а авианосец стал снова виден, оказалось, что

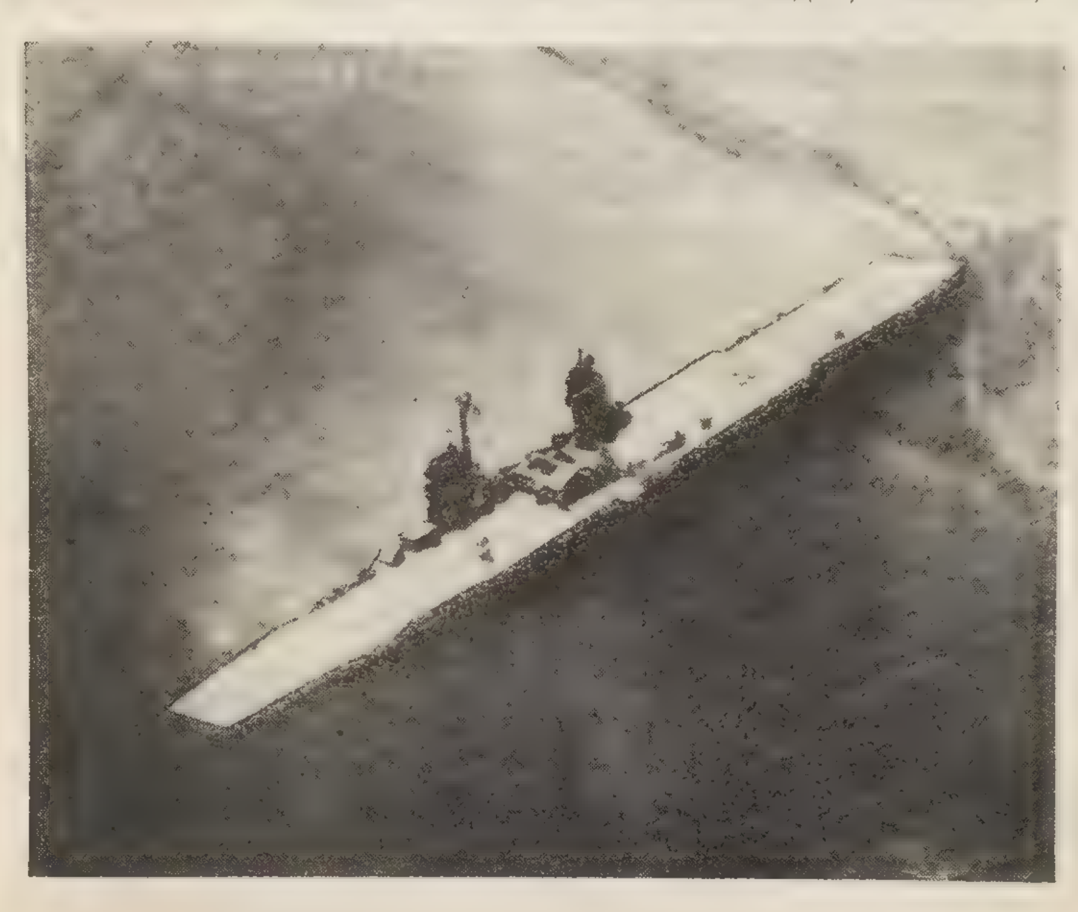


Рис. V.42. Авианосец *Саратога* после ядерного взрыва (испытание „Бейкер")

центральная часть сооружений командного мостика обрушилась на палубу авианосца (рис. V.42). Весьма вероятно, что вскоре после подъема на гребень первой волны «Саратога» провалился в образовавшуюся вслед за первым гребнем впадину и получил сильный удар от гребня второй волны, вызвавший обрушение командного мостика.

Изменение дна лагуны

V.43. Взрыв бомбы при испытании «Бейкер» у Бикини вызвал заметное увеличение глубины лагуны в зоне диаметром около 600 *м*. Наибольшее выявленное изменение глубины составляло 9,7 *м*, но оно явилось скорее результатом разрушения подводной возвышенности, а не углубления ранее ровного дна. Пробы грунта,

взятые перед испытанием со дна лагуны, представляли собой крупнозернистый материал, образовавшийся из остатков морских водорослей с примесью песка и ила (менее 10%). Пробы же, взятые после взрыва, сильно отличались от предыдущих. Вместо материала, образованного из остатков морских водорослей, на дне лагуны в районе взрыва был обнаружен слой ила толщиной до 3 *м*.

Дополнительные сведения об образовании воронки при подводном взрыве даны в конце этой главы.

ОБРАЗОВАНИЕ ВОРОНКИ ПРИ НАЗЕМНОМ И ПОДЗЕМНОМ ВЗРЫВАХ[1]

Размеры воронки при наземном взрыве

V.44. Кроме определенных ранее терминов — **зона разрыва** и **пластическая зона**, можно назвать еще два — это **видимая воронка** и **истинная воронка**. Видимая воронка с диаметром $D_в$ и глубиной

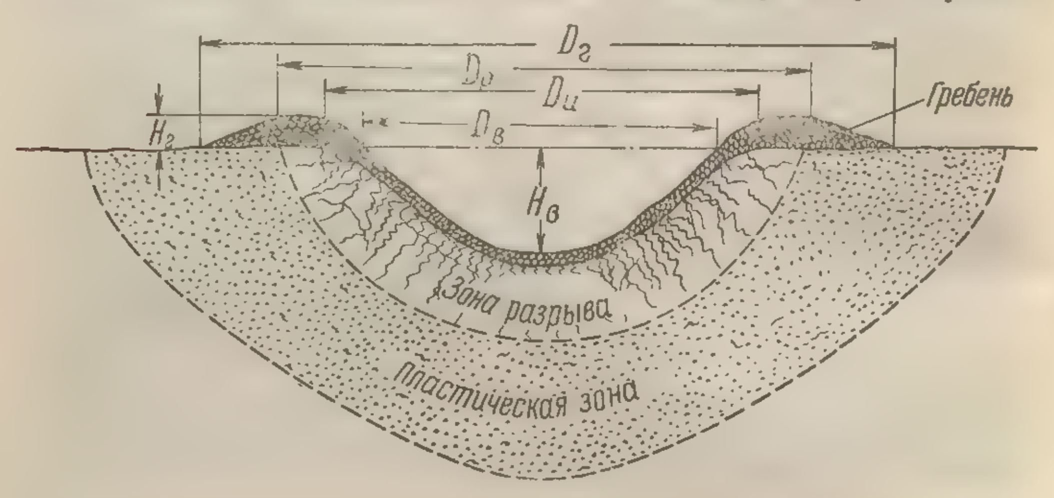


Рис. V.44. Характерные размеры воронки при наземном ядерном взрыве

$H_в$, как это показано на рис. V.44, представляет собой углубление, образующееся в земной поверхности после взрыва. С другой стороны, истинная воронка с диаметром $D_и$ это такая воронка, размеры которой больше размеров видимой воронки на толщину слоя грунта, оторванного и смещенного относительно нижележащих слоев; часть этого грунта поднимается при взрыве в воздух и затем обратно падает в воронку. Приближенная величина объема видимой воронки, если принять, что она имеет форму параболоида, определяется формулой

$$\text{объем воронки} = \frac{\pi D_в^2 H_в}{8}.$$

---

[1] Остальные разделы при чтении данной главы могут быть опущены.

Используя данные, приведенные в § V.7, находим, что объем воронки в сухом грунте при наземном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* составляет около 4200 $м^3$ при весе грунта, выброшенного из воронки, 7500 *т*.

V.45. Диаметр зоны разрыва, обозначенный на рис. V.44 через $D_р$, составляет примерно 1,5 диаметра видимой воронки, то есть

$$D_р \approx 1{,}5 D_в.$$

Полный диаметр зоны, включающей гребень, обозначенный $D_г$, составляет около двух диаметров воронки, то есть

$$D_г \approx 2 D_в.$$

Высота гребня, обозначенная на рис. V.44 через $H_г$, примерно равна одной четвертой части глубины воронки, то есть

$$H_г \approx 0{,}25 H_в.$$

V.46. Глубина и диаметр видимой воронки, образовавшейся в сухом грунте при наземном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т* (где W может иметь любую величину в пределах от 1 тыс. до 20 млн. *т*), могут быть получены из графика, изображенного на рис. V.46.

Этот график построен на основе закона подобия (см. § V.8), согласно которому диаметр воронки изменяется пропорционально кубическому корню, а глубина — пропорционально корню четвертой степени из тротилового эквивалента.

На размеры воронки влияют различные характеристики грунта, в частности его влажность. Поэтому для расчета размеров воронки в различных грунтах, если эти размеры известны для сухого грунта, используют приближенные «коэффициенты грунта». Величины этих коэффициентов, а также пример их применения даны в конце главы.

Радиус воронки при подземном взрыве

V.47. Зависимость радиусов воронки от глубины взрыва при подземном взрыве в сухом грунте ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* показана на графике (рис. V.47). Чтобы определить радиус воронки для взрыва заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*, произведенного на определенной глубине, необходимо прежде всего определить приведенную глубину взрыва, разделив фактическую глубину на $W^{1/3}$; после этого из графика, показанного на рис. V.47, можно будет определить радиус воронки для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, произведенного на расчетной глубине; затем следует умножить результат на $W^{1/3}$; произведение даст искомый радиус воронки. Поправочные коэффициенты для твердого скалистого грунта и грунта, насыщенного водой, даны вместе с примером их использования в конце главы.

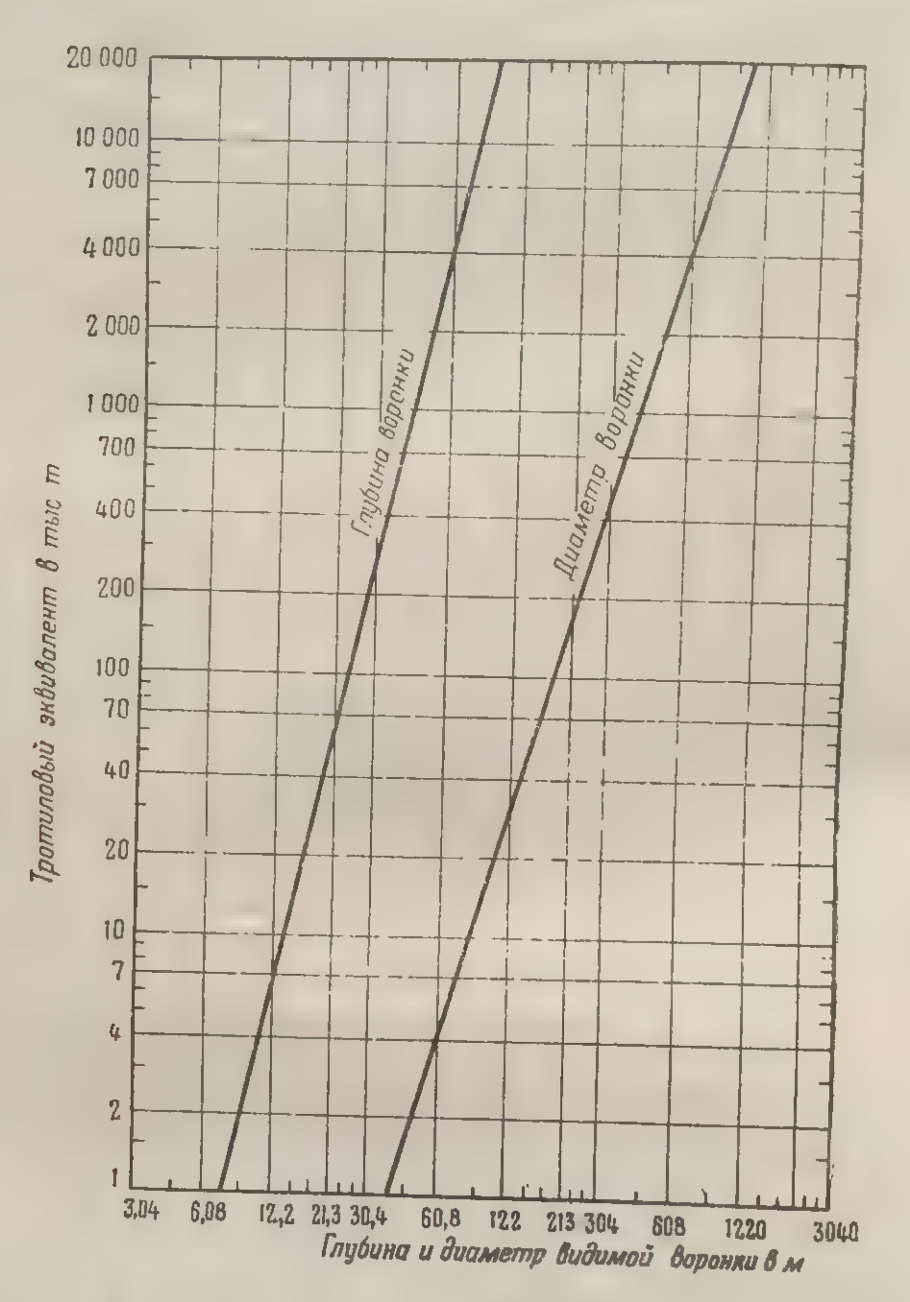


Рис. V.46. Глубина и диаметр видимой воронки, образующейся при контактном наземном взрыве, произведенном на местности с сухим грунтом

График, изображенный на рис. V.46, показывает зависимость диаметра и глубины видимой воронки от тротилового эквивалента для случая контактного наземного взрыва на местности с сухим грунтом. При определении размеров воронки, образующейся в других видах грунта, в расчет следует вводить следующие приближенные коэффициенты:

Вид грунта	Для диаметра	Для глубины
Твердая горная порода (гранит или песчаник)	0,8	0,8
Грунт, насыщенный водой	1,7	0,7

Пример. Дано: произведен контактный взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* на местности с супесчаным грунтом; уровень грунтовых вод находится в нескольких футах от поверхности.

Определить размеры воронки.

Решение: Из графика V.46 находим, что диаметр и глубина воронки в сухом грунте при взрыве указанной мощности составляют соответственно 103 и 16 *м*. Используя приведенные выше коэффициенты, учитывающие вид грунта, определяем приблизительные размеры воронки, образующейся при взрыве заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* в грунте, насыщенном водой:

Диаметр воронки $D_в = 103 \times 1{,}7 = 176$ *м*.
Глубина воронки $H_в = 16 \times 0{,}7 = 11{,}2$ *м*.
Диаметр зоны разрыва $D_р = 1{,}5D_в = 1{,}5 \times 176 = 264$ *м*.
Высота гребня $= 0{,}25H_в = 0{,}25 \times 11{,}2 = 2{,}8$ *м*.

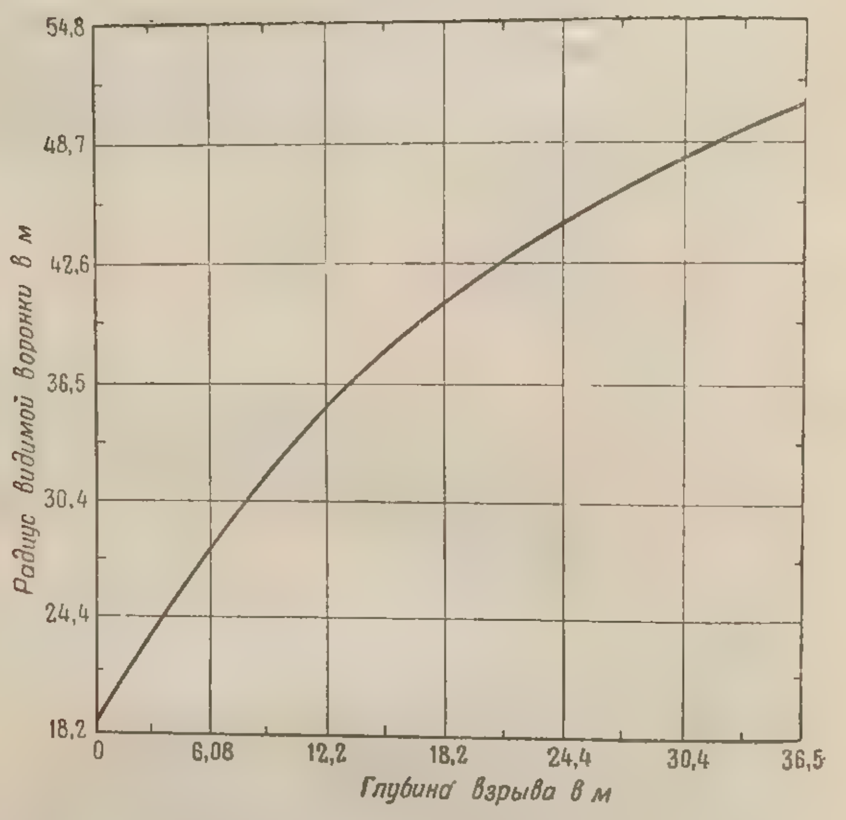


Рис. V.47. Зависимость радиуса видимой воронки от глубины ядерного взрыва (для заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* при сухом грунте)

Кривая графика (рис. V 47) показывает зависимость величины радиуса видимой воронки от глубины взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* в среднем сухом грунте. Для других видов грунта в расчет следует вводить следующие коэффициенты:

Вид грунта	Значение коэффициента
Твердая горная порода (гранит или песчаник)	0,8
Грунт, насыщенный водой	1,7

Метод расчета. Для определения радиуса воронки, образующейся при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*, фактическую глубину взрыва делят сначала на $W^{1/3}$; при этом получают приведенную глубину. Затем радиус воронки, образующейся при взрыве на этой глубине заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, полученный из графика V.47, умножается на $W^{1/3}$.

Пример. Дано: произведен взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* в грунте, насыщенном водой на глубине 15 *м*.

Определить радиус воронки.

Решение: Приведенная глубина взрыва составляет $\frac{15}{20^{1/3}} = \frac{15}{2,7} = 5,5$ *м*. Из рис. V.47 находим, что радиус воронки при взрыве на этой глубине ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* составляет 26,8 *м*. Следовательно, радиус воронки при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*, произведенном на глубине 15 *м* в сухом грунте, равен $26,8 \times 20^{1/3} = 26,8 \times 2,7 = 72,5$ *м*.

Радиус же воронки в грунте, насыщенном водой, равен

$$72,5 \times 1,7 = 123 \text{ м}.$$

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА

Свойства подводной ударной волны

V.48. Некоторые параметры подводной ударной волны, образующейся при ядерных взрывах, были определены путем комбинированного использования данных теоретических исследований и данных, полученных опытным путем при взрывах зарядов тринитротолуола под водой. На графике, представленном на рис. V.48, показаны кривые максимального избыточного давления, импульса и энергии подводной ударной волны на единицу площади на различных расстояниях от центра глубокого подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*. С целью исключения влияния поверхностей принимается, что взрыв производится на большой глубине и в глубоком водоеме; в этом случае величины импульса, приведенные на рис. V.48, не зависят от эффекта «срезания».

Если же центр взрыва и цель находятся вблизи поверхности воды, то величины импульса и энергии будут значительно меньшими.

V.49. Определение параметров подводной ударной волны для взрыва с тротиловым эквивалентом *W* тыс. *т* производится таким же образом, как это было указано в главе III для воздушного взрыва. Таким образом, если расстояние от центра подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, на котором возникает определенное избыточное давление, составляет D_0, то такое же избыточное давление для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом *W* тыс. *т* будет на расстоянии *D* от центра взрыва, где $D = D_0 W^{1/3}$ (так же, как в уравнении III.86.2 для случая воздушного взрыва). Импульс и энергия подводной ударной волны определяются так же, как импульс и энергия при воздушном взрыве (как это было показано в § III.88). Таким образом,

$$\left.\begin{aligned} I &= I_0 W^{1/3} \\ E &= E_0 W^{1/3} \end{aligned}\right\} \text{ на расстоянии от центра взрыва}$$

$$D = D_0 W^{1/3},$$

где *I* и *E* представляют собой соответственно импульс и энергию на расстоянии *D* от центра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом *W* тыс. *т*;

I_0 и E_0 — аналогичные величины, но на расстоянии D_0 от центра взрыва заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*.

Закон подобия иллюстрируется примером, решение которого производится с помощью графика, представленного на рис. V.48.

V.50. Скорость уменьшения давления подводной ударной волны

на определенном расстоянии от центра взрыва во времени может быть представлена выражением:

$$p(t) = pe^{-t/\theta}, \qquad (V.50.1)$$

где $p(t)$ — давление в момент t после прихода фронта ударной волны в фиксированную точку;

p — максимальное давление, наблюдавшееся в момент прибытия фронта ударной волны в данную точку;

θ — параметр, называемый **постоянной времени.** Физически θ представляет собой время, за которое максимальное давление p уменьшится в e раз.

Величина постоянной времени изменяется с расстоянием от центра взрыва; некоторые ее значения, вычисленные для случая глубокого подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, приведены на рис. V.48. Постоянная времени для случая взрыва заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т* может быть определена путем использования закона подобия (аналогично тому, как определяются энергия и импульс в примере, приведенном выше).

V.51. Из уравнения V.50.1 видно, что величина θ определяет степень уменьшения давления подводной ударной волны во времени и, следовательно, дает возможность оценить продолжительность действия подводной ударной волны. Так как θ с увеличением расстояния от центра взрыва возрастает, то растет соответственно и продолжительность действия подводной ударной волны.

V.52. Значения максимального давления и продолжительности действия подводной ударной волны при взрыве в неглубоком водоеме будут меньше соответствующих значений, приведенных выше в графике для взрыва в глубоком месте; это объясняется влиянием поверхности воды и дна водоема.

Изменение максимального давления воды в зависимости от расстояния от эпицентра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* на средней глубине определено на основе измерений, произведенных во время испытания «Бейкер». Характер этого изменения показан на графике, изображенном на рис. V.52.

Этим графиком можно пользоваться также для оценки действия ядерных взрывов других мощностей, произведенных на средней глубине в водоемах, имеющих приведенную глубину (т. е. фактическую глубину, деленную на $W^{1/3}$), равную 20 *м*.

Расстояние, на котором подводная ударная волна будет иметь заданное максимальное давление, определяется путем умножения значения расстояния, на котором такое давление имеет место при взрыве заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, на коэффициент $W^{1/3}$.

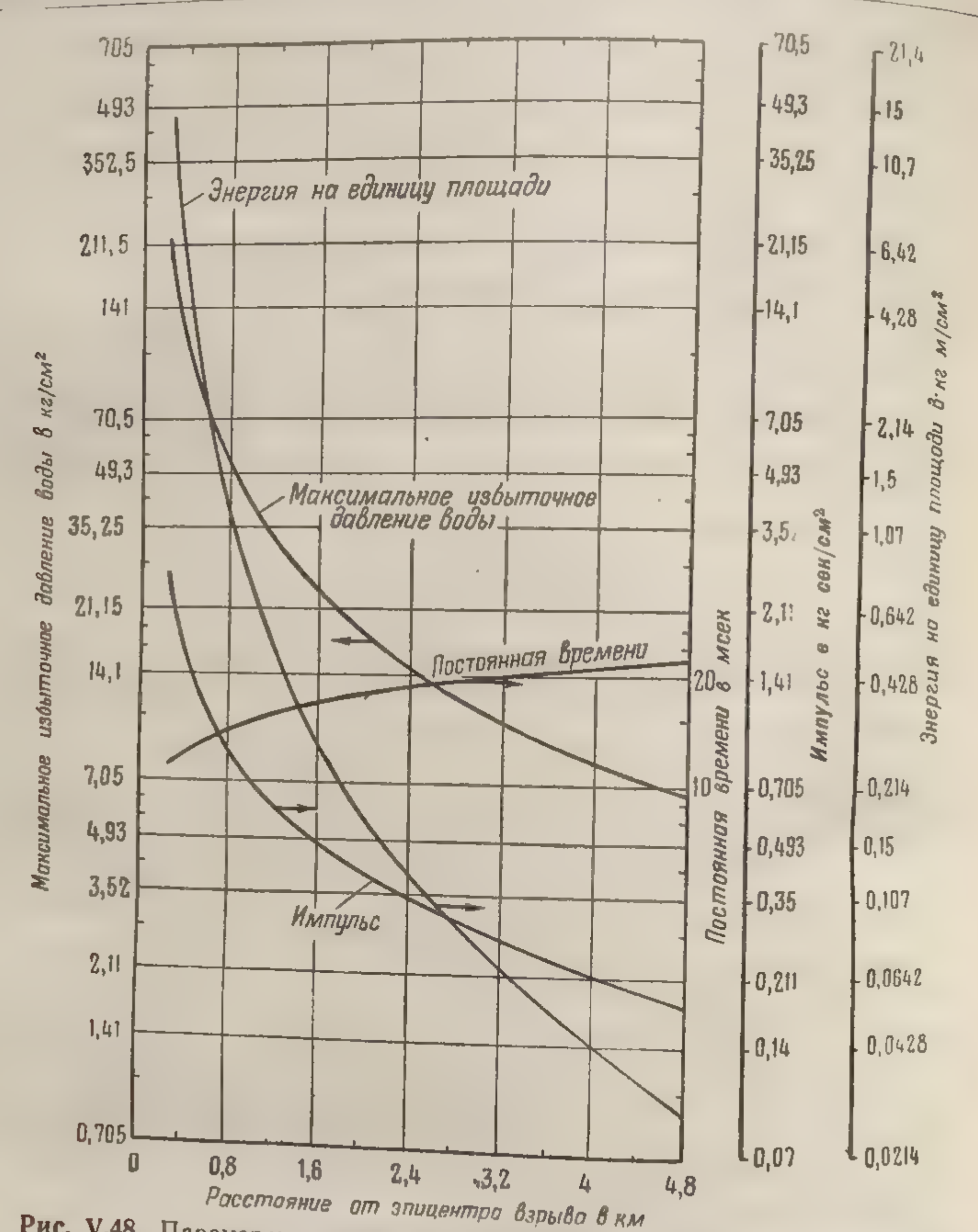


Рис. V.48. Параметры подводной ударной волны при глубоком подводном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

Кривые графика, показанного на рис. V.48, показывают зависимость максимального избыточного давления подводной ударной волны, энергии волны на единицу площади, импульса и постоянной времени (определение ее дано в § V.50) от расстояния до центра взрыва мощностью 1 тыс. *т*, произведенного в глубоком водоеме.

Метод расчета. Расстояние D, на котором наблюдается заданное давление при взрывах ядерных зарядов с тротиловым

эквивалентом W, не равным 1 тыс. *т*, определяется из выражения

$$D = D_0 W^{1/3},$$

где D_0 — расстояние, на котором наблюдается данное давление при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*. Для импульса, энергии и постоянной времени соответствующие уравнения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} I &= I_0 W^{1/3} \\ E &= E_0 W^{1/3} \\ \theta &= \theta_0 W^{1/3} \end{aligned} \right\} \text{при } D = D_0 W^{1/3},$$

где I_0, E_0 и θ_0 — соответственно импульс, энергия и постоянная времени на расстоянии D_0 для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*;

I, E, θ — импульс, энергия и постоянная времени для взрыва заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т* на расстоянии D.

Пример. Дано: в глубоком водоеме произведен взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т*.

Определить максимальное избыточное давление, импульс, энергию и постоянную времени на расстоянии 5 *км* от центра взрыва.

Решение: Расстояние D_0 для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, соответствующее $D = 5$ *км* для взрыва заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т*, равно $\frac{5}{30^{1/3}} = \frac{5}{3{,}1} = 1{,}6$ *км*.

Из рис. V.48 следует, что максимальное избыточное давление при взрыве заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* на расстоянии 1,6 *км* от центра взрыва составляет 23 *кг/см²*.

Согласно закону подобия такое же давление при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* будет наблюдаться на расстоянии $1{,}6 \times 30^{1/3} = 5{,}0$ *км* от места взрыва. Следовательно, искомая величина максимального избыточного давления составляет 23 *кг/см²*.

Величины импульса, энергии и постоянной времени на расстоянии 1,6 *км* от центра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* равны:

импульс = 0,456 *кг · сек/см²*;
энергия = 0,27 *кгм/см²*;
постоянная времени = 17,5 *мсек*.

Следовательно, на расстоянии 5 *км* от центра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* эти величины будут иметь следующие значения:

импульс $= 0{,}456 \times 30^{1/3} = 1{,}42$ *кгсек/см²*;
энергия $= 0{,}27 \times 30^{1/3} = 0{,}84$ *кгм/см²*;
постоянная времени $= 17{,}5 \times 30^{1/3} = 54$ *мсек*,

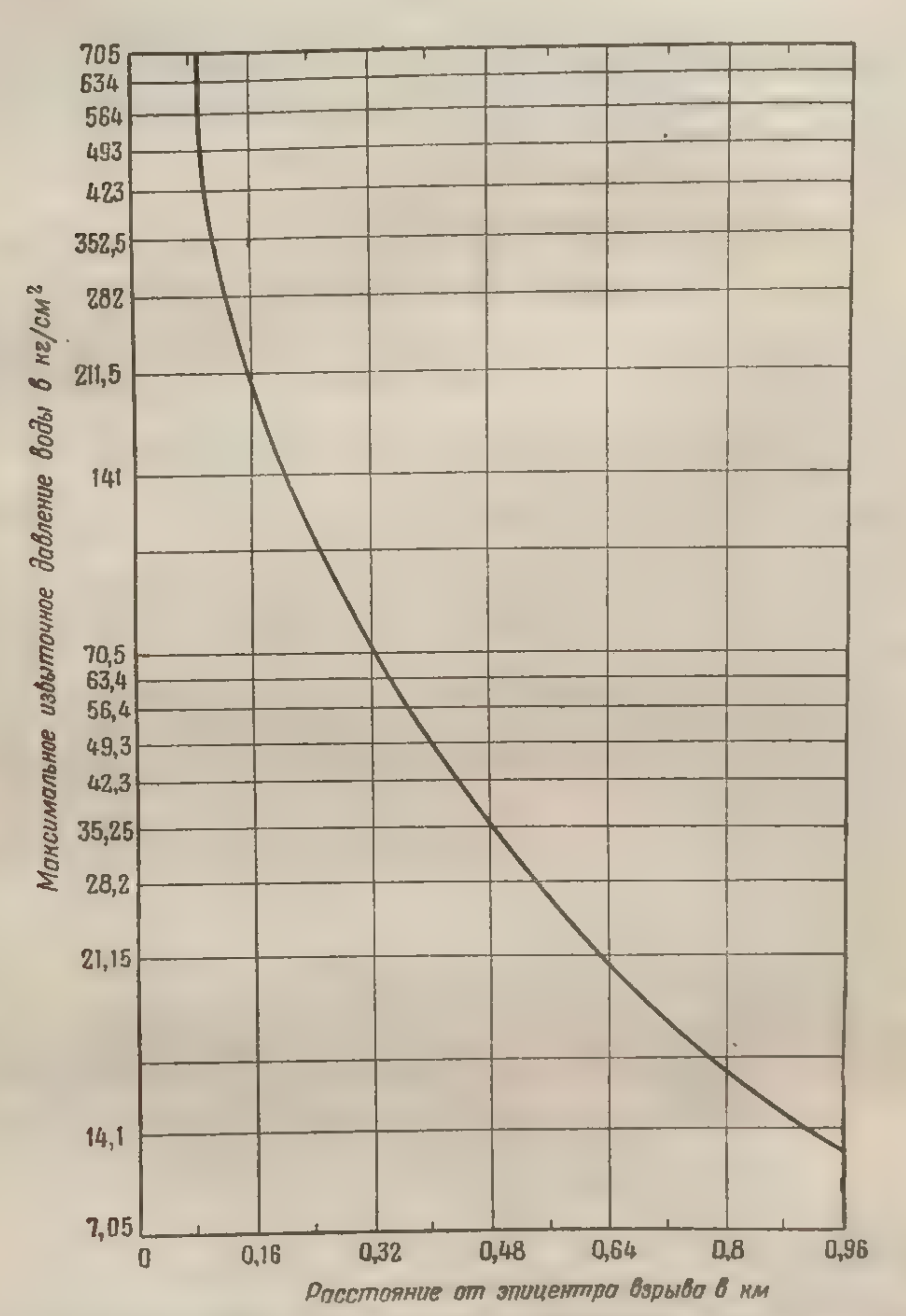


Рис. V.52. Изменение максимального избыточного давления воды при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, произведенном на глубине 10 *м* в водоеме глубиной 20 *м*

Кривая (рис. V.52) показывает зависимость максимального избыточного давления в воде от расстояния до центра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, произведенного на средней глубине в водоеме глубиной 20 *м*.

Метод расчета. В случае если приведенная глубина водоема составляет 20 *м*, расстояние, на котором наблюдается заданное давление при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*, определяется умножением соответствующего расстояния при взрыве заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* на величину $W^{1/3}$.

Пример. Дано: взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* произведен на средней глубине в водоеме глубиной 60 *м*.

Определить расстояние, на котором величина максимального избыточного давления составляет 21 *кг/см²*.

Решение: Приведенная глубина, соответствующая фактической глубине 60 *м*, составляет $\frac{60}{30^{1/3}} = \frac{60}{3,1} = 19,5$ *м*. Это достаточно близко к величине 20 *м*, чтобы можно было использовать график на рис. V.52.

Из графика определяем, что при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* максимальное избыточное давление, равное 21 *кг/см²*, наблюдается на расстоянии 0,625 *км* от центра взрыва. Следовательно, при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* максимальное избыточное давление будет иметь указанное значение на расстоянии $0,625 \times 30^{1/3} = 0,625 \times 3,1 = 1,94$ *км*.

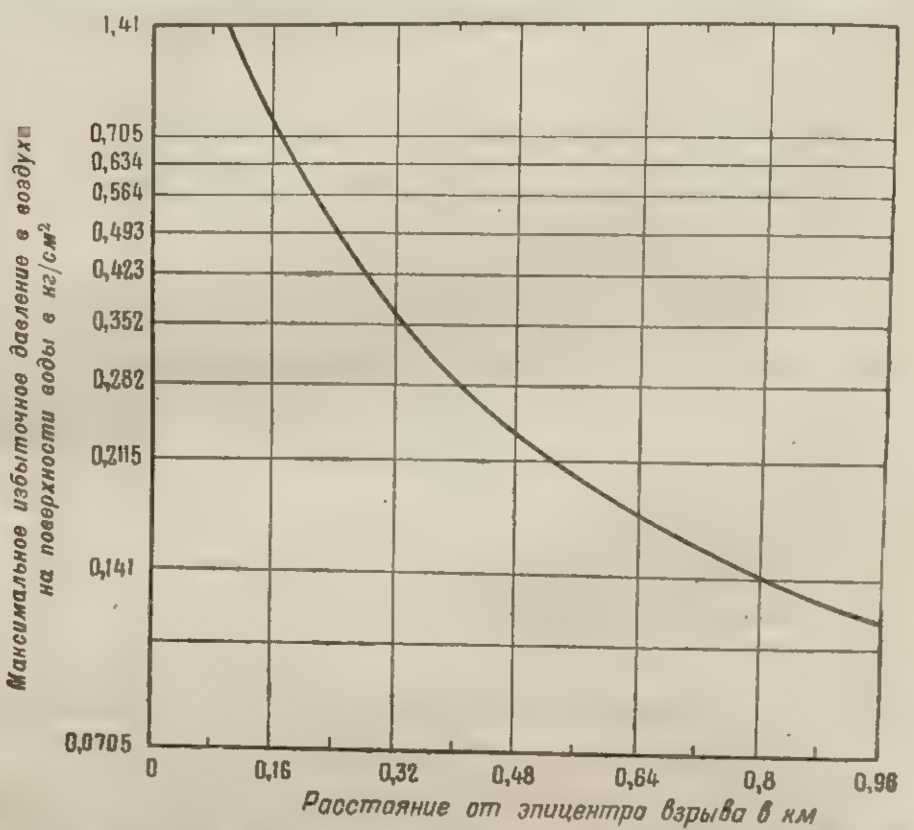


Рис. V.53. Изменение максимального избыточного давления в воздухе на поверхности воды при подводном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, произведенном на небольшой глубине

Кривая графика (рис. V.53) показывает зависимость максимального избыточного давления в воздухе на поверхности воды от расстояния до эпицентра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, произведенного на небольшой глубине.

Метод расчета. Расстояние, на котором максимальное избыточное давление в воздухе будет иметь заданное значение при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*, определяется умножением расстояния, на котором давление будет иметь то же значение при взрыве заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, на коэффициент $W^{1/3}$.

Пример. Дано: взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* произведен на средней глубине в водоеме глубиной 30 *м*.

Определить расстояние, на котором избыточное давление в воздухе на поверхности воды составляет 0,35 *кг/см²*.

Решение: Из графика V.53 следует, что избыточное давление воздуха при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* имеет величину 0,35 *кг/см²* на расстоянии 0,32 *км* от

эпицентра. Следовательно, при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* давление будет иметь такое же значение на расстоянии от эпицентра, равном $0{,}32 \times 30^{1/3} = 1$ *км*.

Воздушная ударная волна при подводных взрывах

V.53. Как указывалось выше, определенное количество энергии подводной ударной волны, образующейся при неглубоком подводном взрыве, передается в воздух в виде воздушной ударной волны. Вообще говоря, доля энергии, переданная таким образом, зависит от глубины взрыва, однако, чтобы иметь некоторое суждение о величинах избыточного давления в воздухе, в качестве исходных величин были использованы данные, полученные в ходе испытаний «Бейкер».

На основе этих данных с использованием известного закона подобия была построена кривая для подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, приведенная на рис. V.53. Избыточные давления, полученные из этого графика, будут меньше соответствующих давлений ударной волны, образующейся при взрыве на поверхности, но больше соответствующих давлений ударной волны глубокого подводного взрыва. Эта кривая зависимости избыточного давления от расстояния может быть использована вместе с законом подобия для приближенной оценки избыточного давления ударной волны при любых взрывах на небольшой глубине в водоемах средней глубины.

Высота волн, образующихся на поверхности воды при подводных взрывах

V.54. На графике, изображенном на рис. V.54, приведены приблизительные величины максимальных высот волн (от гребня до впадины) на различных расстояниях от центра подводного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*. Эти величины были получены на основе измерений, произведенных в ходе испытаний «Бейкер» (табл. V.40). Данные таблицы можно использовать для определения высоты волн для взрыва заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т* в водоеме, приведенная глубина которого (определяемая как фактическая глубина, деленная на $W^{1/4}$) составляет 25,8 *м*. Высота волны на любом данном расстоянии от эпицентра взрыва в этом случае может быть получена умножением соответствующей величины, найденной из графика, представленного на рис. V.54 (справедливого для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*) на коэффициент $W^{1/2}$. Если приведенная глубина водоема менее 25,8 *м*, то высота волны уменьшается прямо пропорционально фактической глубине водоема. Следует заметить, что кривая на рис. V.54 получена в предположении, что водоем имеет постоянную глубину, т. е. при этом не учитывается ослабление волны, когда она достигнет мелководья.

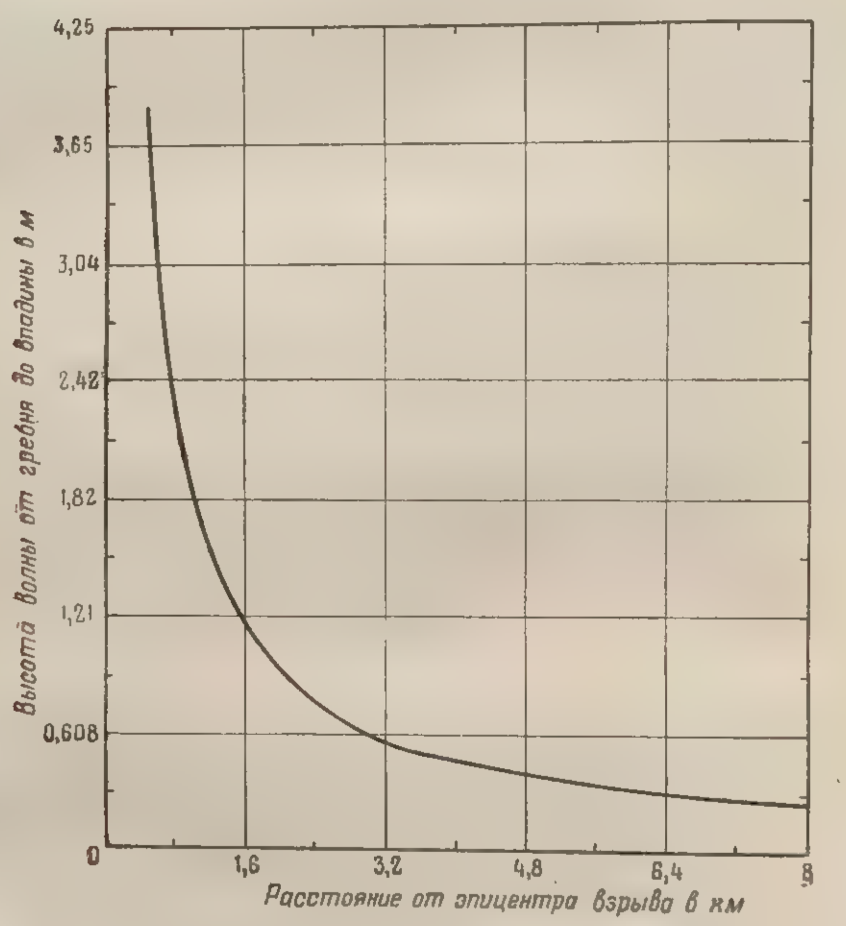


Рис. V.54. Максимальная высота волны при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, произведенном в водоеме глубиной 26 *м*

Кривая (рис. V.54) показывает изменение приближенного значения максимальной высоты волны (от гребня до впадины) в зависимости от расстояния до эпицентра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*. Взрыв произведен в водоеме глубиной 25,8 *м* (это соответствует расчетной глубине при испытании «Бейкер», произведенном у атолла Бикини).

Метод расчета. Высота волны на заданном расстоянии от эпицентра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т* определяется умножением высоты волны, образующейся на таком же расстоянии при взрыве заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, на коэффициент $W^{1/2}$. Это справедливо, если расчетные глубины взрывов одинаковы. Для водоемов, глубина которых меньше чем 25,8 $W^{1/4}$ *м*, высота волны уменьшается прямо пропорционально фактической глубине водоема.

Пример. Дано: а) взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* произведен в водоеме глубиной 60 *м*; б) взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 30 тыс. *т* произведен в водоеме глубиной 30 *м*.

Определить ожидаемую максимальную высоту волны в каждом случае на расстоянии 6,4 *км* от эпицентра взрыва.

Решение. а) Приведенная глубина водоема составляет $\frac{60}{30^{1/4}} = \frac{60}{2,34} = 25,8$ *м*. Следовательно, в этом случае график, представленный на рис. V.54, может быть использован. Из графика определяем, что на расстоянии 6,4 *км* от эпицентра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* максимальная высота волны составляет 0,3 *м*. Следовательно, высота волны на расстоянии 6,4 *км* от эпицентра взрыва для тротилового эквивалента 30 тыс. *т* составляет $0,3 \times 30^{1/2} = 0,3 \times 5,5 = 1,65$ *м*.

б) Так как глубина 30 *м* меньше, чем глубина 25,8 $W^{1/4}$ *м* для величины W, равной 30 тыс. *т*, то высота волны будет пропорциональна фактической глубине водоема.

Если при глубине водоема 60 *м* высота волны на расстоянии 6,4 *км* от эпицентра взрыва заряда мощностью 30 тыс. *т* составляет 1,65 *м*, то при глубине водоема 30 *м* высота волны на том же расстоянии будет равна $1,65 \times \frac{30}{60} = 0,825$ *м*.

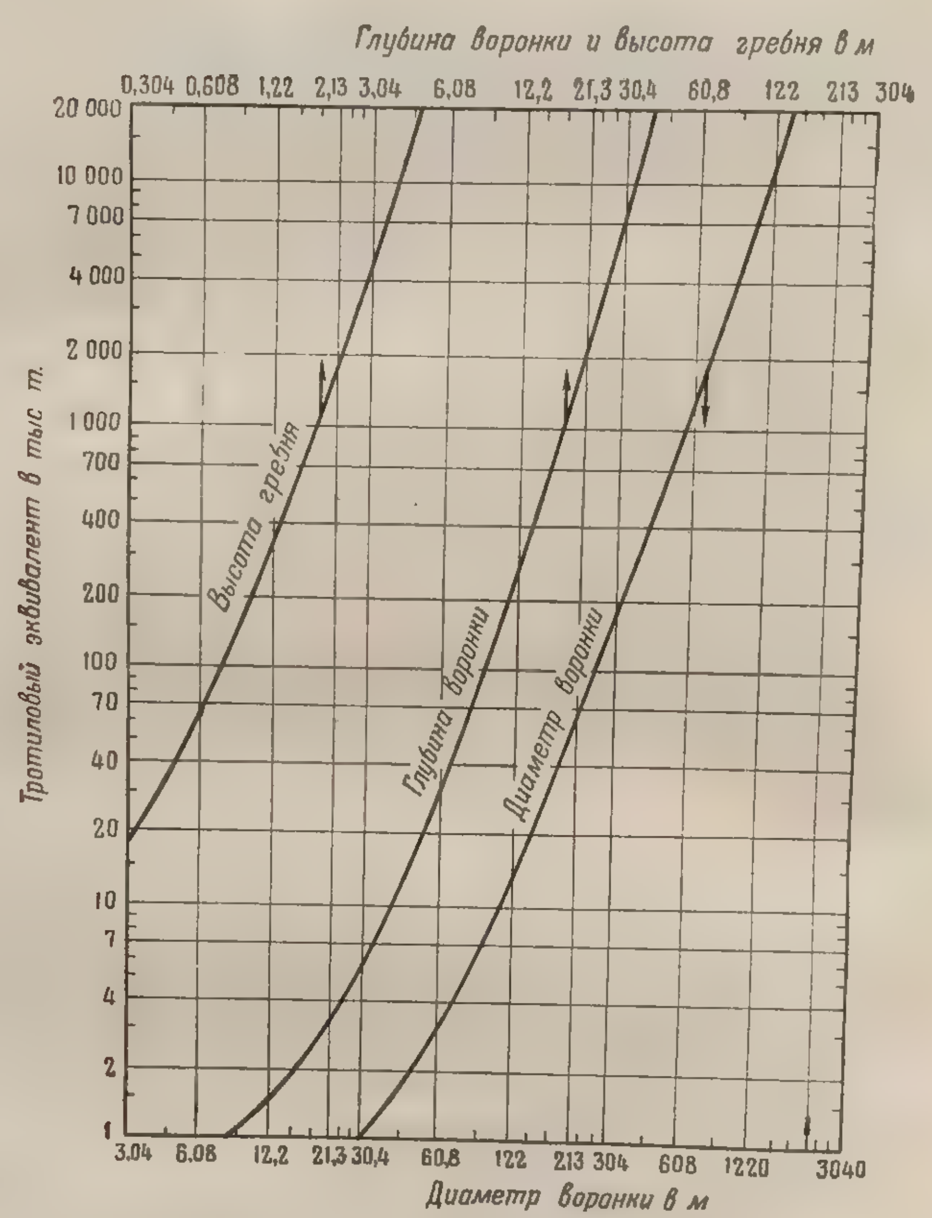


Рис. V.55. Размеры воронки при подводном взрыве

Кривые графика (рис. V.55) показывают зависимость высоты гребня, а также глубины и диаметра воронки в дне водоема, образующейся при подводном взрыве, от величины тротилового эквивалента. Данный график справедлив для взрывов, произведенных на глубине до 6 *м* в водоеме глубиной 18 *м* с дном, состоящим из песчаных, песчано-гравийных или мягких горных пород.

При других породах дна водоема для определения размеров воронки необходимо пользоваться следующими поправочными коэффициентами.

Грунт	Для диаметра	Для глубины	Для высоты гребня
Лёсс	1,0	1,7	0,7
Глина	1,0	2,3	2,3
Твердые горные породы	0,7	0,5	0,4
Ил	0,7	0,4	0,2

Пример. Дано: ядерный заряд с тротиловым эквивалентом 200 тыс. *т* взорван под водой, вблизи поверхности в водоеме глубиной 18 *м*. Дно состоит преимущественно из глинистых грунтов.

Определить размеры воронки.

Решение: Согласно графику размеры воронки для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 200 тыс. *т* имеют следующие значения:

диаметр — 330 *м*;
глубина — 11,2 *м*;
высота гребня — 1 *м*.

Размеры воронки с учетом поправочных коэффициентов для глинистого дна водоема составляют:

диаметр — $330 \times 1{,}0 = 330$ *м*;
глубина — $11{,}2 \times 2{,}3 = 25{,}4$ *м*;
высота гребня — $1 \times 2{,}3 = 2{,}3$ *м*.

Образование подводной воронки

V.55. Размеры воронок, образующихся на дне водоема в результате подводных взрывов, для некоторого диапазона мощностей взрывов даны на рис. V.55. Эти величины даны для взрывов на глубине менее чем 6 *м* в водоеме глубиной 18 *м*, имеющем песчаное, песчано-гравийное дно или дно, состоящее из мягких горных пород. Поправочные коэффициенты для других пород, из которых состоит дно, даны в пояснении к рис. V.55.

ГЛАВА VI

РАЗРУШЕНИЯ (ПОВРЕЖДЕНИЯ) ОБЪЕКТОВ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ, ВОЛНОЙ СЖАТИЯ В ГРУНТЕ И ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

ВВЕДЕНИЕ

VI.1. В трех предыдущих главах дано описание основных явлений, сопровождающих ядерные взрывы в воздухе, грунте и воде; дана также общая характеристика разрушений (повреждений) различных объектов, вызываемых этими взрывами. В настоящей главе будет дано общее определение критериев разрушения и будет рассмотрена зависимость степени разрушения ряда специфических типов сооружений от расстояния как функции мощности ядерного взрыва. Кроме того, будет указан метод подробного анализа факторов, которые определяют степень разрушения различных сооружений при действии воздушной ударной волны.

VI.2. Общие выводы относительно ожидаемого действия ядерных взрывов на различные сооружения приведены в трех диаграммах (рис. VI.41а, б и в). Данные указанных диаграмм получены на основе результатов теоретических расчетов, лабораторных исследований, изучения последствий атомных взрывов в Японии и экспериментальных ядерных взрывов.

Однако разнообразие комплексов сооружений, особенно городских, исключает возможность точного предсказания действия ударной волны на эти объекты. Тем не менее при правильном понимании и использовании имеющихся сведений можно получить данные, удовлетворяющие практическим потребностям. Приводимые ниже выводы относятся к некоторым средним типам сооружений, которые могут быть на реальных объектах.

РАЗРУШЕНИЯ (ПОВРЕЖДЕНИЯ) ОБЪЕКТОВ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Классификация разрушений

VI.3. При рассмотрении вопросов, связанных с разрушениями городских комплексов сооружений, вызываемыми воздушной ударной волной ядерного взрыва, Федеральное управление гражданской обороны (ФУГО) применяет классификацию этих разрушений, основывающуюся на выделении четырех зон — А, Б, В и Г. Зона А характеризуется почти полным разрушением зданий воздушной ударной волной; в зоне Б основная часть зданий получает такие сильные повреждения, которые исключают возможность их восстановления. В зоне В здания получают средние повреждения. Эти здания могут быть восстановлены, но на время ремонта должны быть освобождены от жильцов. В зоне Г характер повреждения зданий таков, что на время ремонта не требуется освобождать их от жильцов. Эта классификация относится к наиболее распространенным типам городских зданий и особенно удобна для планирования и определения объема восстановительных работ. Так как данная классификация относится к некоторому среднему комплексу сооружений, то выделяемые согласно этой классификации зоны не следует определять по характеру разрушений очень прочных или очень слабых сооружений. Следует отметить, кроме того, что эта зональная классификация, установленная для городского комплекса сооружений, не может относиться к таким объектам, как, например, самолеты или корабли.

VI.4. Для классификации разрушения отдельных сооружений комплекса необходимо пользоваться измененной системой классификации ФУГО. Вследствие различной устойчивости сооружений (иногда сходных по конструкции) к действию воздушной ударной волны зона А для одного объекта не обязательно будет таковой для другого. То же самое справедливо и в отношении других зон. В измененной системе классификации буквами А, Б, В и Г обозначаются не зоны разрушений, а степень или тип разрушения определенного сооружения или объекта.

А обозначает, что сооружение фактически полностью разрушено.

Б обозначает сильное разрушение, при котором для использования сооружения потребуется почти полная его перестройка.

В обозначает среднее разрушение, при котором для использования сооружения требуется произвести капитальный ремонт.

Г обозначает, что объект (или сооружение) поврежден легко. Для его восстановления требуется произвести незначительный ремонт или можно обойтись вообще без ремонта.

Особенности применения этой классификации для определения степени повреждений конкретных объектов будут изложены ниже;

будут приведены также и таблицы для определения типа разрушений различных сооружений на заданных расстояниях от центра взрыва определенной мощности.

Повреждение наземных сооружений

VI.5. Характеристика повреждений типа *Б*, *В* и *Г* для различных сооружений приведена в таблицах VI.5а и б. Так как повреждения типа *А* представляют собой фактически полное разрушение, то характеристика их в таблицы не включена. Для удобства пользования таблицами в первой таблице приведены данные о повреждениях, вызываемых действием избыточного давления, т. е. силами, действующими главным образом в процессе обтекания и отражения ударной волны. Во второй таблице приводятся данные о повреждениях, вызываемых главным образом действием скоростного напора. Следует отметить, что в этих таблицах не даны описания повреждений очень высоких зданий, которые имеются во многих больших городах Соединенных Штатов. Это объясняется отсутствием необходимых данных о характере повреждений такого рода зданий. Ни в Нагасаки, ни в Хиросима не было сооружений такого типа, и они не испытывались при экспериментальных взрывах.

VI.6. На элементы конструкций с коротким периодом колебаний (приблизительно до 0,05 *сек*), разрушающиеся при малых пластических деформациях, существенное влияние при взрыве оказывает только величина максимального избыточного давления; длительность действия ударной волны оказывает при этом незначительное влияние. Значения максимального избыточного давления, при которых происходит разрушение элементов такого типа, приведены в табл. VI.6. Для элементов конструкций, изготовленных из хрупких материалов, разница между величиной избыточного давления, еще не вызывающего разрушения, и величиной давления, вызывающего полное разрушение, очень невелика. Другие элементы конструкции разрушаются после некоторой пластической деформации. Однако и для них разница в значениях избыточного давления, вызывающего небольшое повреждение и полное разрушение, также невелика. В табл. VI.6. указаны значения избыточного давления в падающей ударной волне, вызывающего повреждения стеновых панелей, плоскость которых обращена к эпицентру взрыва. Панели, ориентированные таким образом, что на них не действует отраженное давление, получат такие же повреждения при удвоенной величине максимального избыточного давления в падающей волне.

Повреждение легких заглубленных сооружений с грунтовой обсыпкой

VI.7. Воздушная ударная волна является основным фактором, определяющим степень повреждения легких заглубленных сооружений с грунтовой обсыпкой. Слой грунта, покрывающий сооруже-

ние, обеспечивает существенную защиту от воздушной ударной волны, а также от летящих осколков. Толщина слоя грунта над сооружением обычно определяется требованиями защиты от ядерной радиации. Наряду с этим такой слой грунта должен обеспечивать также устойчивость сооружения к действию избыточного давления или скоростного напора (см. гл. VIII).

VI.8. Обсыпка поверхностных и котлованных сооружений производится путем создания над ними земляного холма. При такой форме грунтовой обсыпки снижается коэффициент отражения ударной волны (см. рис. VI.82а) и улучшается аэродинамическая форма сооружения. Это в свою очередь приводит к значительному уменьшению сил, действующих на сооружение. Дополнительное преимущество, создаваемое обсыпкой, состоит в повышении жесткости или сопротивляемости смещению податливых сооружений вследствие противодействия грунта.

Таблица VI.5а

Характер повреждений сооружений, чувствительных главным образом к действию избыточного давления ударной волны в процессе обтекания

Тип сооружений	Характер повреждений		
	Б	В	Г
Трехэтажные железобетонные здания с железобетонными стенами без оконных проемов с высокой устойчивостью к действию ударной волны[1].	Разрушение стен, сильная деформация ферм, обрушение части колонн на первом этаже.	Растрескивание стен, легкая деформация всего здания, повреждение входов, срыв дверей, отслаивание бетона (см. рис. IV.82а).	Повреждений нет.
Многоэтажные железобетонные здания с бетонными стенами и малой площадью окон (пять этажей).	Разрушение стен, сильная деформация ферм, обрушение небольшой части колонн первого этажа.	Образование многочисленных трещин на наружных стенах, образование крупных трещин на внутренних перегородках, обрушение некоторых перегородок. Остаточная деформация ферм; отслаивание бетона.	Вдавливание окон и дверей внутрь; образование трещин на внутренних перегородках.

[1] Способны противостоять воздействию избыточного давления головной ударной волны, равного 1,4 $кг/см^2$ при ядерном взрыве мощностью 20 тыс. *т*.

Продолжение

Тип сооружений	Характер повреждений		
	Б	В	Г
Многоэтажные здания с несущими стенами, многоквартирные кирпичные здания высотой до трех этажей.	Обрушение несущих стен, приводящее к полному разрушению здания (см. рис. IV.89а).	Многочисленные трещины на наружных стенах, крупные трещины на внутренних перегородках или их обрушение.	Вдавливание окон и дверей внутрь; образование трещин на внутренних перегородках.
Четырехэтажные здания с массивными несущими стенами. Большие сооружения (более 60×60 *м* в плане). В этом случае наружные стены могут быть сильно повреждены, в то время как внутренняя часть дома остается почти неповрежденной.	Обрушение несущих стен, приводящее к разрушению конструкций, поддерживаемых этими стенами. Если некоторые несущие стены в достаточной степени защищены другими стенами, то часть сооружения может получить лишь средние повреждения (см. рис. IV.89б).	Сильное растрескивание наружных стен, обращенных к месту взрыва, и внутренних перегородок.	Вдавливание окон и дверей внутрь; образование трещин на внутренних перегородках.
Одноэтажные и двухэтажные жилые здания с деревянным каркасом.	Разрушение каркаса, вызывающее обрушение большей части здания (см. рис. IV.14).	Образование трещин на каркасе; сильное повреждение крыши; обрушение внутренних перегородок (см. рис. IV.8).	Вдавливание окон и дверей внутрь; растрескивание внутренних перегородок (см. рис. IV.16).
Заполненные резервуары для хранения жидкого топлива с коническими крышками (незаполненные резервуары более уязвимы).	Сильная деформация боковых стенок; разрывы швов резервуаров (см. рис. IV.74а).	Продавливание крыши; продавливание или деформация боковых стенок выше уровня жидкости.	Сильное повреждение крыши (см. рис. IV.74б).

Таблица VI.5б

Характер повреждений сооружений, подверженных главным образом действию нагрузки от скоростного напора

Тип сооружений	Характер повреждений		
	Б	В	Г
Одноэтажные промышленные здания с легким стальным кар-	Сильная деформация каркаса (изгиб до половины	Остаточная деформация каркаса (см. рис. IV.62б).	Вдавливание окон и дверей внутрь, срыв эле-

Продолжение

Тип сооружений	Характер повреждений		
	Б	В	Г
касом (имеют краны грузоподъемностью до 5 *т*) с легкими непрочными стенами. Легко подвержены разрушению.	высоты колонн) (см. рис. IV.55а и б).	Для эксплуатации кранов требуется ремонт.	ментов легкого стенового заполнения или сильная их деформация.
Промышленные одноэтажные здания со стальным каркасом средней прочности (имеют краны грузоподъемностью до 20 *т*). Непрочные стены легко разрушаются.	Сильная деформация каркаса (изгиб до половины высоты колонн).	Остаточная деформация каркаса. Для эксплуатации кранов требуется ремонт.	То же
Промышленные одноэтажные здания с тяжелым стальным каркасом (имеют краны грузоподъемностью до 50 *т*).	То же	То же	»
Пятиэтажные административные здания со стальным каркасом. Непрочные стены легко разрушаются.	Сильная деформация каркаса. Обрушение колонн начинается с нижнего этажа.	Умеренная остаточная деформация каркаса, разрушение внутренних перегородок.	Вдавливание окон и дверей внутрь. Срыв легкого стенового заполнения; образование трещин на внутренних перегородках с одновременной их деформацией.
Пятиэтажные административные здания с железобетонным каркасом. Непрочные стены легко разрушаются.	То же (см. рис. IV.82б)	Умеренная остаточная деформация каркаса. Обрушение внутренних перегородок. Частичное отслаивание бетона (см. рис. IV.85б)	Вдавливание окон и дверей внутрь; срыв панели легкого стенового заполнения. Образование трещин на внутренних перегородках с одновременной их деформацией.
Автодорожные и железнодорожные мосты со сквозными фермами.	Полное разрушение поперечных связей; обрушение ферм.	Частичное разрушение поперечных связей, вызывающее уменьшение грузоподъемности моста приблизительно на 50%.	Грузоподъемность моста не уменьшается; повреждения состоят в деформации поперечных связей.

Таблица VI.6

Разрушение (повреждение) элементов сооружений, чувствительных к действию максимального избыточного давления

Элементы сооружения	Характер разрушения (повреждения)	Приблизительная величина избыточного давления в падающей ударной волне, *кг/см²*
Окна (большие и малые).	Выбивание стекол; возможно разрушение оконных рам.	0,035—0,07
Легкое стеновое заполнение из волнистых асбестовых панелей.	Разрушение.	0,07—0,14
Панели из волнистой стали и алюминия.	Нарушение соединений с последующей сильной деформацией.	0,07—0,14
Кирпичные стены толщиной 20—30,5 *см* (без усиления).	Разрушения, вызываемые деформацией среза и смещением.	0,49—0,56
Стеновое заполнение из деревянных панелей (дома стандартной конструкции).	Нарушение соединений и срыв деревянных панелей.	0,07—0,14
Бетонные или шлакобетонные стены толщиной 20—30,5 *см* (без усиления).	Разрушение стен.	0,14—0,21

VI.9. Под легкими заглубленными сооружениями подразумеваются такие сооружения, глубина заложения которых позволяет иметь грунтовую обсыпку на одинаковом уровне с поверхностью земли. Однако заглубление их при этом все же недостаточно для того, чтобы получить большое значение отношения глубины заложения сооружения к его пролету, которое обусловливает защитное действие грунтовой обсыпки (см. § VI.11). При глубине заложения сооружения до 3 *м* в большинстве грунтов происходит небольшое ослабление давления воздушной ударной волны, действующего на поверхность сооружения. Как показали атомные испытания в штате Невада, увеличение давления на сооружение вследствие отражения волны сжатия от верхней поверхности сооружения не наблюдается.

VI.10. Горизонтальная составляющая давления, действующего на вертикальные стенки сооружения, находящегося в сухом, хорошо утрамбованном глинистом грунте, составляет около 15% давления, действующего на покрытие сооружения. Однако для наиболее распространенных пористых, насыщенных влагой грунтов боковое давление, вероятно, будет выше и может стать равным величине давления, действующего на покрытие сооружения. Давление, действующее на пол сооружения, который конструктивно составляет одно целое с его стенами, может достигать 75—100% давления, действующего на его покрытие.

VI.11. Для сооружения, находящегося на глубине, при которой отношение глубины заложения сооружения к его пролету приближается к единице (или превышает единицу), будет иметь место некоторое защитное действие окружающего грунтового свода. Предварительные данные, полученные при испытаниях на полигоне в штате Невада, показали, что грунтовый свод уменьшает нагрузку на сооружения, построенные из гибких элементов, однако установить степень такого уменьшения пока не представляется возможным.

VI.12. Характер возможных повреждений легких заглубленных сооружений зависит от ряда факторов, включающих характеристики сооружения, грунта, степень заглубления сооружения и величину направленного вниз давления, т. е. максимального избыточного давления воздушной ударной волны. В таблице VI.12 даны предельные величины максимального избыточного давления, вызывающего повреждения различной степени двух типов сооружений с грунтовой обсыпкой. Выбор одного из двух предельных значений давления, указанных в таблице, зависит от конструкции сооружения, состояния грунта, формы грунтовой обсыпки и его ориентации относительно направления распространения падающей ударной

Таблица VI.12

Разрушения и повреждения неглубоких котлованных и наземных сооружений с грунтовой обсыпкой

Тип сооружений	Тип разрушений (повреждений)	Максимальное избыточное давление, $кг/см^2$	Характер разрушений (повреждений)
Легкие сводчатые наземные сооружения из волнистых стальных панелей длиной 6—7,5 *м*, с толщиной обсыпки над сводом 0,9 *м*.	А	2,45—2,8	Полное разрушение.
	Б	2,1—2,45	Повреждение части свода со стороны, обращенной к взрыву.
	В	1,4—1,75	Деформация торцовых стенок и свода; возможно повреждение входной двери.
	Г	0,7—1,0	Возможно повреждение вентиляционной системы и входной двери.
Легкое железобетонное наземное или заглубленное укрытие с грунтовой обсыпкой толщиной не менее 0,9 *м* (панели толщиной 5—7,5 *см*); балки расположены на расстоянии 1,2 *м* одна от другой.	А	2,1—2,45	Разрушение сооружения.
	Б	1,75—2,1	Частичное разрушение сооружения.
	В	1,0—1,75	Деформация панелей, образование большого количества трещин, вдавливание внутрь отдельных панелей.
	Г	0,7—1,0	Образование трещин, возможно повреждение входной двери.

волны. Зависимость степени повреждения от расстояния до эпицентра взрыва для этих типов сооружений представлена на рис. VI.41а.

VI.13. В качестве иллюстрации на рис. VI.13 показано повреждение (типа Б) сводчатого сооружения с грунтовой обсыпкой, построенного из волнистой стали (марки 10). Повреждение соору-

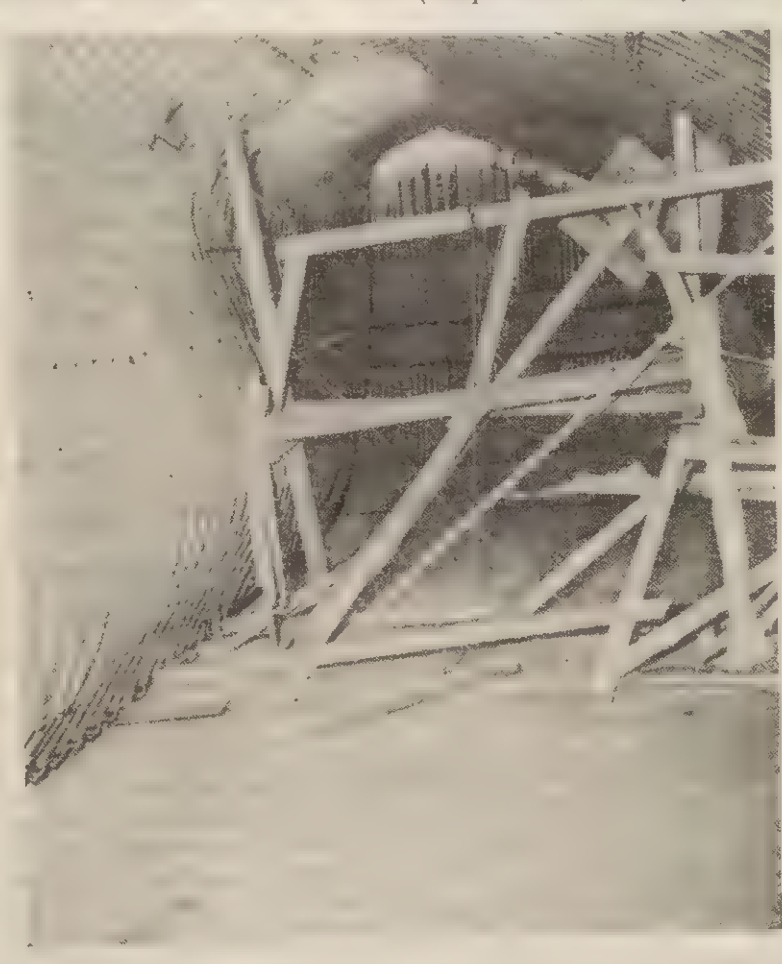


Рис. VI.13. Повреждения типа Б сооружения из волнистой стали с грунтовой обсыпкой

жения состоит в оседании половины свода, что было вызвано главным образом действием скоростного напора на передний откос обсыпки.

VI.14. Значения максимального избыточного давления, вызывающего полное разрушение сводчатых сооружений из волнистой стали с грунтовой обсыпкой толщиной 0,9 *м*, приведены в табл. VI.12. Эти давления имеют величину 2,45—2,8 *кг/см²*. Для разрушения сооружений, заглубленных ниже уровня поверхности земли, потребовалось бы избыточное давление в пределах 2,8—3,5 *кг/см²*. Увеличение избыточного давления, вызывающего разрушение таких

сооружений, объясняется тем, что в условиях полного заглубления скоростной напор практически отсутствует. Следует учесть, что обычная строительная техника позволяет строить подземные сооружения, способные противостоять избыточному давлению ударной волны на поверхности в 7 *кг/см²* и более (см. гл. XII).

Разрушение (повреждение) наземных транспортных средств

VI.15. К рассматриваемым здесь различным средствам наземного транспорта относятся гражданские легковые и грузовые автомобили, машины для перемещения грунта (бульдозеры, грейдеры, скреперы) и железнодорожный подвижной состав (локомотивы, товарные вагоны, цистерны и платформы). Эти виды транспортных средств подвержены главным образом действию скоростного напора, а не избыточного давления воздушной ударной волны. Характеристика различных типов разрушений (повреждений) транспортных средств приведена в табл. VI.15.

Таблица VI.15

Характеристика разрушений (повреждений) различных средств наземного транспорта

Характер оборудования	Тип повреждения	Характер повреждения
Гражданский автотранспорт (легковые и грузовые автомобили), бульдозеры, грейдеры.	А	Полное разрушение и разбрасывание отдельных частей.
	Б	Сильная деформация наружных частей; срыв дверей и капотов машин. Эксплуатация возможна только после капитального ремонта.
	В	Опрокидывание; образование вмятин на внешних поверхностях; деформация рамы. Требуется средний ремонт.
	Г	Выбивание стекол, образование вмятин; иногда опрокидывание. Эксплуатация возможна без ремонта.
Железнодорожный подвижной состав (товарные вагоны, цистерны и платформы).	А	Полное разрушение и разбрасывание отдельных частей.
	Б	Сбрасывание вагонов с рельсов и сильное их повреждение. Часть вагонов остается пригодной для эксплуатации.
	В	Разрушение дверей и повреждение корпуса. Необходим заводской ремонт (см. рис. IV.97а).
	Г	Легкие повреждения дверей и корпуса. Эксплуатация вагонов возможна без ремонта.

Продолжение

Характер оборудования	Тип повреждения	Характер повреждения
Железнодорожные локомотивы (дизельные или паровые).	А	Сильная деформация или полное разрушение.
	Б	Опрокидывание; срыв отдельных частей. Требуется капитальный ремонт.
	В	Возможно опрокидывание. После установки на рельсы могут быть отведены на завод, где потребуется произвести средний ремонт.
	Г	Выбивание стекол; небольшое повреждение отдельных частей; пригодны для немедленной эксплуатации.

Радиусы зон этих типов разрушений (повреждений) для различных мощностей взрыва могут быть определены при помощи диаграммы, изображенной на рис. VI.41в. Приведенные на диаграмме данные по автотранспорту относятся к тяжелым грузовым автомобилям. Для легковых и легких грузовых автомобилей соответствующие расстояния будут несколько больше, для тяжелых дорожных строительных машин эти величины будут меньше тех, которые указаны на диаграмме.

Повреждение транспортных самолетов в местах базирования

VI.16. Самолеты очень чувствительны к воздействию воздушной ударной волны, и, как указано в главе IV, максимальное избыточное давление является важнейшим параметром, определяющим степень их повреждения. Нагрузки, создаваемые избыточным давлением от 0,07 до 0,14 *кг/см*^{2}, достаточны для того, чтобы продавить обшивку самолета, изогнуть его шпангоуты и стрингеры. При более высоком избыточном давлении массы воздуха, движущиеся за фронтом ударной волны, создают сильный скоростной напор, который стремится повернуть, сдвинуть, поднять или опрокинуть находящиеся на земле самолеты, в результате чего они могут получить повреждение при столкновении с другими самолетами или сооружениями и при ударе их о землю. Самолеты также могут сильно повреждаться летящими предметами.

VI.17. На степень повреждения самолетов определенного типа на заданном расстоянии от эпицентра взрыва влияет несколько факторов. Самолеты, обращенные носовой частью к месту взрыва, повреждаются меньше, чем те, которые повернуты к движущейся ударной волне хвостом или боком. Экранирование данного самолета другим самолетом или каким-либо сооружением или неровно-

стями земной поверхности может уменьшить степень повреждения, особенно от летящих предметов. Стандартное крепление самолетов, применяемое при сильных ветрах, может также уменьшить степень разрушения.

VI.18. В табл. VI.18 приведена характеристика различных повреждений самолетов вместе с указанием величин избыточного давления, которые могут вызвать эти повреждения. Расстояния от эпицентра взрыва, на которых наблюдаются эти повреждения, и зависимость расстояний от мощности ядерного взрыва можно определить при помощи диаграммы, представленной на рис. VI.41а. Приведенные на диаграмме данные применимы к транспортным самолетам, находящимся на открытой местности и произвольно ориентированным относительно центра взрыва. Следует, однако, отметить, что эти данные получены на основе испытаний военных самолетов при взрывах ядерных бомб мощностью порядка нескольких тысяч тонн. При взрыве мощностью порядка миллиона тонн действие ударной волны большей длительности может вызвать иные результаты, чем те, которые указаны на диаграмме.

Таблица VI.18

Характеристика разрушений (повреждений) самолетов, находящихся на земле

Тип разрушения (повреждения)	Характер разрушения (повреждения)	Избыточное давление, $кг/см^2$
А	Полное разрушение.	0,42
Б	Повреждения, при которых восстановление самолета экономически нецелесообразно.	0,28
В	Для восстановления самолета требуется капитальный ремонт (см. рис. IV.100 а и б).	0,21
Г	Ремонт не требуется или требуется незначительный ремонт и замена частей.	0,07

VI.19. Для самолетов, наружные поверхности которых покрыты тканью или другим возгораемым материалом, радиусы разрушений, вызываемых световым излучением при определенных условиях, могут превышать радиусы разрушений, вызываемых ударной волной (см. рис. VI.41в). Чувствительность к световому излучению может быть ослаблена экранированием возгораемых материалов от прямого действия светового излучения, а также окраской их в светлые тона, которые отражают бóльшую часть светового излучения (см. гл. VII).

Повреждение судов

VI.20. Повреждение судов при взрыве ядерного оружия в воздухе или на поверхности воды будет происходить главным образом от действия воздушной ударной волны, так как непосред-

ственно по воде передается давление небольшой величины, вследствие чего надводная часть корабля повреждается в наибольшей степени. Краткое описание результатов испытаний «Эйбл» у атолла Бикини было дано в главе IV; здесь приводятся некоторые общие выводы. Особенно чувствительны к воздействию воздушной ударной волны мачты, радиолокационные антенны, дымовые трубы, электрооборудование и другое оборудование подобного типа. На расстояниях от центра взрыва, на которых не происходит потопления корабля, судовые двигатели не получат, по-видимому, существенных повреждений. Котлы и вытяжные устройства составляют наиболее уязвимый вид тяжелого оборудования корабля, повреждение которых воздушной ударной волной будет во многих случаях являться причиной лишения корабля способности к передвижению.

VI.21. Классификация типов повреждений судов торгового флота при ядерных взрывах приведена в табл. VI.21. Повреждения типа А и Б здесь объединены, так как трудно установить четкую границу между ними. Зависимость типа повреждений от расстояния до эпицентра взрыва представлена диаграммой на рис. VI.41а. Характер разрушений, вызываемых на кораблях воздушной ударной волной, показан на фотоснимках в главе IV.

Таблица VI.21

Повреждение судов при ядерном взрыве

Тип повреждения	Характер повреждения
А и Б	Очень сильные повреждения или потопление (корабль затонул или поврежден до такой степени, что для его восстановления требуется полная перестройка).
В	Средние повреждения, в результате которых корабль теряет способность двигаться. Для восстановления корабля требуется капитальный ремонт.
Г	Легкие повреждения. Эксплуатация корабля возможна, хотя различные виды его оборудования и могут требовать ремонта.

Повреждение коммунальных сооружений

VI.22. В данном разделе дается характеристика повреждений воздушных линий электропередач, линий связи, а также мачт радиостанций и телевизионных станций. Характер повреждений различных подземных сетей будет рассмотрен ниже (§ VI.31). Степень повреждения таких сооружений, как электростанции, насосные станции и резервуары для хранения жидкого топлива, можно установить на основе данных, приведенных выше, в разделе о наземных сооружениях (§ VI.5 и последующие параграфы). Повреждение воздушных линий электропередачи связано главным образом

с поломкой столбов. Линии, проходящие в радиальном направлении относительно центра взрыва, менее подвержены воздействию ударной волны, чем линии, которые проходят в направлении, перпендикулярном к направлению распространения ударной волны. При определении степени повреждений из диаграммы, устанавливающей зависимость повреждений от расстояния до эпицентра взрыва, для других промежуточных положений линий необходимо произвести интерполяцию результатов, приведенных на этой диаграмме. Для электросетей, телефонных и телеграфных линий повреждение типа А означает, что бо́льшая часть столбов повалена и провода порваны (см. рис. IV.111). Повреждения типа Б, В или Г в этом случае не различаются, так как за пределами зоны разрушения типа А повреждения будут небольшими и легко устранимыми.

VI.23. Характеристика повреждений мачт радио- и телевизионных станций высотой от 60 до 150 *м* приведена в табл. VI.23. Зависимость радиусов зон повреждений этих линий от мощности взрыва представлена диаграммой на рис. VI.41в.

Таблица VI.23

Повреждения радиомачт

Тип разрушения (повреждения)	Характер разрушения (повреждения)
А и Б	Мачты разрушены или упали на землю (см. рис. IV. 109 а).
В	Мачты частично деформированы, но удерживаются растяжками; непригодны для передачи.
Г	Растяжки провисли, но мачты пригодны для передачи (см. рис. IV.109б).

Повреждение лесных массивов

VI.24. Анализ повреждений лесных массивов при ядерных взрывах, приведенный в данном разделе, относится преимущественно к лиственным и хвойным лесам с плотностью около 700 деревьев на 1 *га*. Так как деревья подвержены главным образом действию скоростного напора, то зона, в которой повреждения переходят от типа А к типу Г, сравнительно невелика. Особенно трудно определить переход от зоны А к зоне Б, поэтому характеристика повреждений этих двух типов дается вместе. Повреждение лесных массивов показано на рис. VI.24а и б. Характеристика различных повреждений лесных массивов приведена в табл. VI.24.

Так как действие воздушной ударной волны на лес подобно действию сильного ветра, то в этой таблице даны также скорости ветров, которые могли бы вызвать аналогичные повреждения.

VI.25. Зависимость степени повреждений от расстояния до эпицентра взрыва для леса средней густоты приведена на диаграмме,



Рис. VI.24а. Воздействие ядерного взрыва (избыточное давление 0,27 *кг/см*²) на лесные массивы (повреждения типа Б)



Рис. VI.24б. Воздействие ядерного взрыва (избыточное давление 0,17 *кг/см*²) на лесные массивы (повреждения типа В)

изображенной на рис. VI.41в. Для лиственного леса эти расстояния несколько больше средних, для хвойного они немного меньше.

Таблица VI.24

Повреждения лесных массивов

Тип повреждения	Характер повреждения	Скорость эквивалентного ураганного ветра, *м/сек*
А и Б	До 90% всех деревьев повалено, оставшиеся деревья лишены ветвей и листьев (рис. VI.24 а). Район непроходим для автотранспорта; преодоление завалов пешеходами сильно затруднено.	58,5—63
В	Около 30% деревьев повалено; оставшиеся деревья имеют редкие оголенные ветви (рис. VI.24 б). Район проходим для автотранспорта только после расчистки.	10—15
Г	Повалено немного деревьев, сорвана часть листьев и ветвей. Район проходим для автотранспорта.	27—36

РАЗРУШЕНИЯ (ПОВРЕЖДЕНИЯ) ОБЪЕКТОВ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ВОЛНОЙ СЖАТИЯ В ГРУНТЕ И ПОДВОДНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Подземные сооружения

VI.26. Подземные сооружения могут быть построены таким образом, что они окажутся практически неуязвимыми при действии воздушной ударной волны (§ VI.14). Такие сооружения могут быть, однако, повреждены или разрушены в результате образования воронки или действия волны сжатия, возникающей в грунте при взрыве на поверхности, вблизи поверхности или под землей. Средняя плотность подземных сооружений будет обычно меньше, чем плотность смещаемого грунта. Кроме того, известно, что импульс давления в грунте, возникающий при контактном наземном или подземном взрыве, имеет обычно большую продолжительность действия по сравнению с временными показателями сооружения, а давление во фронте волны сжатия увеличивается относительно медленно.

VI.27. Если исходить из этих фактов, то следует ожидать, что подземные сооружения сравнительно небольшого размера будут смещаться от воздействия удара. Это предположение основывается на опыте. Смещение сооружений тесно связано с перемещением грунта при прохождении волны сжатия. Другими словами, если ускорение частиц грунта имеет определенные горизонтальные и вертикальные составляющие, то можно ожидать, что небольшие подземные сооружения будут иметь почти ту же величину составляющих максимального ускорения.

VI.28. Как указывалось в § V.18, а также в последующих параграфах, разрушения сооружений, вызванные образованием воронки и действием волны сжатия, могут характеризоваться тремя различными зонами их расположения, а именно: 1) зоной воронки, 2) зоной, простирающейся, грубо говоря, до пределов пластической зоны, т. е. приблизительно на расстояние 2,5 радиусов воронки, и 3) зоной, в которой происходит кратковременное смещение грунта, проходящее без заметных остаточных деформаций. В этой области действие волны сжатия не вызовет каких-либо значительных повреждений сооружений.

VI.29. Значения параметров ударной волны, которые главным образом влияют на масштаб повреждений, не определены ни теоретически, ни эмпирически. Однако имеются факты, свидетельствующие о том, что степень повреждения сооружений зависит от величины радиуса воронки. Некоторые примеры этой зависимости даны в табл. VI.29. Различные значения расстояний для одного типа повреждений объясняются влиянием глубины (см. § V.18) и особенностями характеристик грунта, в котором возведено подземное сооружение. В дальнейшем будет показано, что за пределами пластической зоны, т. е. на расстояниях от эпицентра, превышающих 2,5 радиуса воронки, волна сжатия в грунте не вызывает значительных повреждений.

Таблица VI.29

Повреждения (разрушения) подземных сооружений, вызываемые действием волны сжатия в грунте
(сооружения возведены на умеренной глубине)

Тип сооружений	Тип повреждения (разрушения)	Расстояние от эпицентра взрыва	Характер повреждения (разрушения)
Сравнительно небольшие по размерам тяжелые убежища с высокой устойчивостью к взрыву.	А и Б	1,25 радиуса воронки.	Полное разрушение или сильное смещение.
	В	1,25—2 радиуса воронки.	Повреждение внутреннего оборудования.
	Г	2—2,5 радиуса воронки.	Нарушение соединений, образование небольших трещин в местах соединения отдельных частей сооружения.
Сравнительно длинные и гибкие конструкции (трубопроводы).	А	1,5 радиуса воронки.	Деформация и разрыв.
	Б	1,5—2 радиуса воронки.	Легкая деформация; иногда разрыв.
	В	2—3 радиуса воронки.	Нарушение герметичности соединений.

VI.30. Примером сооружений первого типа, указанных в табл. VI.29, является прочное подземное убежище из железобетона. Следует ожидать, что такие сооружения не будут разрушены даже в том случае, если они будут находиться за пределами воронки, непосредственно у ее границ. Однако при этом следует учесть тот факт, что эти сооружения будут покрыты грунтом, сильно зараженным радиоактивными веществами (см. § IX.58).

VI.31. К длинным гибким конструкциям, указанным в табл. VI.29, относятся прежде всего трубопроводы подземных сетей различного назначения. Повреждение их в зонах А и Б происходит в основном в результате смещения почвы и в зоне В в результате воздействия постоянных или кратковременных нагрузок. Расстояние, на котором будут наблюдаться повреждения типа В, зависит от ориентации трубопроводов относительно центра взрыва. Следует считать, что на одном и том же расстоянии более серьезные повреждения получат трубопроводы, расположенные в радиальном направлении относительно центра взрыва. Разрушение трубопроводов будет происходить главным образом в местах их соединений и ввода в здания. Эти повреждения будут тем значительнее, чем меньше прочность материала трубопроводов.

VI.32. Тоннели и линии метро в пределах зоны воронки будут полностью разрушены; в известной степени они будут повреждены и за пределами этой области. Такие же сооружения, проложенные в плотной скале или имеющие прочную обделку, будут хорошо противостоять действию волны сжатия. Скала, будучи упругой средой, очень хорошо передает волну сжатия, и когда эта волна достигает стенки тоннеля, то на поверхности раздела скалы и воздуха возникает волна разрежения (отрицательного давления[1]).

VI.33. При некоторых условиях возможно разрушение стенок тоннеля и в скальной породе. Откалывание скалы происходит в случае, когда разрывающее усилие отраженной волны разрежения превосходит прочность скалы на растяжение. Масштабы вывала породы и разрушения материала обделки будут зависеть от мощности и длительности действия волны сжатия, размеров и формы тоннеля и прочности скалы и обделки.

VI.34. В случае когда часть подземного сооружения выходит на поверхность земли, повреждение подземной части в основном будет таким, как указано в табл. VI.29 при условии достаточной прочности стен. Однако при наземных и подземных взрывах зона разрушений, вызываемых действием воздушной ударной волны, как правило, будет намного превосходить 3-ю, так называемую пластическую зону.

---

[1] Образование волны разрежения (отрицательного давления) происходит в результате отражения волны сжатия от поверхности среды с меньшей плотностью. Более подробно это рассматривалось в связи с вопросом о распространении ударной волны в воде (см. § V.23).

Повреждение судов от подводной ударной волны

VI.35. Изложение вопросов, связанных с действием подводной ударной волны на суда, основанное на опыте испытаний «Бейкер», было дано в главе V. В большинстве случаев подводная ударная волна будет являться наиболее важным фактором, определяющим масштаб повреждений. Исключения из этого правила могут иметь место при взрывах, произведенных на весьма незначительной глубине или при взрывах очень большой мощности, произведенных в неглубоких водоемах. В этих случаях воздушная ударная волна будет иметь большее значение, чем подводная ударная волна.

VI.36. Тип повреждений судов от подводной ударной волны определяется тем же методом, что и тип повреждений от воздушной ударной волны. Следовательно, характеристика повреждений, приведенная в табл. VI.21, применима во всех случаях, независимо от того, вызвано это повреждение действием подводной или воздушной ударных волн. Зависимость между характером повреждений торговых судов и расстоянием от центра подводного взрыва, произведенного в гавани, устанавливается по диаграмме, изображенной на рис. VI.41в.

Повреждения подводных сооружений

VI.37. Как и при действии воздушной ударной волны, повреждения подводных сооружений, вызываемые подводной ударной волной, будут зависеть от размера сооружений и некоторых временны́х показателей. В частности, по-видимому, будут иметь важное значение такие показатели, как постоянная времени подводной ударной волны (см. § V.50), и, с другой стороны, время пластической деформации и время обтекания сооружения волной, т. е. время, необходимое для распространения волны на расстояния, соответствующие размерам подводного сооружения. Если подводное сооружение находится вблизи поверхности воды, то в определенных условиях будет иметь значение также и время поверхностного «срезания» (см. § V.26).

VI.38. Если постоянная времени подводной ударной волны велика по сравнению с временными показателями сооружения, т. е. если подводная ударная волна имеет сравнительно большую длительность действия, то действие ударной волны будет аналогично действию статического давления. В этих условиях максимальное давление будет являться критерием степени повреждения. Эти рассуждения справедливы для небольших и прочных подводных сооружений, так как такие сооружения будут иметь незначительные по величине временны́е показатели.

VI.39. Для крупных прочных подводных сооружений, когда длительность действия ударной волны невелика по сравнению с

временны́ми показателями сооружения, при определении степени повреждения будет иметь значение импульс ударной волны (рис. V.48). Следует помнить в связи с этим, что величина импульса и вызванное им повреждение будут значительно меньше, если волна, отраженная от поверхности раздела водной и воздушной сред, достигнет цели вскоре после достижения ее основной ударной волной.

VI.40. Если большие остаточные (пластические) деформации в крупном подводном сооружении, вызванные мгновенным действием фронта ударной волны, не вызовут его разрушения, то, по-видимому, степень повреждений будет в основном зависеть от энергии ударной волны (рис. V.48).

Если сооружение находится вблизи поверхности воды, то величина энергии, достаточная для его повреждения, может быть снижена до безопасного уровня эффектом поверхностного «срезания».

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕНИЙ

Зависимость степени повреждений от расстояния

VI.41. На основе обобщения данных, полученных при изучении последствий атомных взрывов в Японии и при проведении различных ядерных испытаний, а также результатов теоретического анализа (см. специальный раздел данной главы) были установлены определенные зависимости между мощностью взрыва, расстоянием от эпицентра и степенью повреждения. Результаты, полученные для типичного воздушного (ВВ) и наземного контактного взрывов (НВ), представлены на диаграммах (рис. VI.41а, б и в). Диаграмма на рис. VI.41а относится к сооружениям, чувствительным главным образом к нагрузкам обтекания, в то время как диаграмма на рис. VI.41б относится к сооружениям, чувствительным главным образом к нагрузкам, возникающим от действия скоростного напора. Из диаграммы, показанной на рис. VI.41в, могут быть определены повреждения средств транспорта от воздушных и наземных взрывов, а также повреждения судов от подводного взрыва, произведенного в гавани, и повреждение самолетов от светового излучения. На последующих страницах даются примеры использования диаграмм, изображенных на этих рисунках.

VI.42. Как уже говорилось в § VI.4, система, принятая для классификации повреждений отдельных сооружений, получена в результате изменения зональной системы, используемой Федеральным управлением гражданской обороны для классификации повреждений среднего городского комплекса сооружений. Согласно измененной классификации буквами А, Б, В и Г обозначаются типы повреждения отдельных сооружений или объектов. Подроб-

ная характеристика типов повреждений для различных объектов была дана выше в различных таблицах. Повреждения типа А представляют собой почти полное разрушение объекта; повреждения типа Б являются достаточно серьезными; они вызывают необходимость выполнения большого объема работ по восстановлению (которое может быть даже нецелесообразным). При повреждении типа В эксплуатация сооружения возможна только после большого ремонта. При повреждениях типа Г ремонт не требуется или требуются незначительные восстановительные работы.

VI.43. Данные диаграмм, изображенных на рис. VI.41а, б и в, справедливы для некоторых средних условий. Они получены на основе предположений о том, что: 1) объект находится на уровне моря (если высота объекта относительно уровня моря менее 1500 *м*, введение каких-либо поправок не требуется); 2) поверхность земли достаточно ровная (пересеченная местность будет обеспечивать некоторое местное экранирование и защиту) и 3) сооружения имеют средние характеристики (т. е. средние размеры и прочность). Использование данных диаграмм в условиях, которые значительно отличаются от средних, предоставляется на усмотрение лиц, занимающихся подобными расчетами.

VI.44. Так как сооружения, перечень которых приведен на рис. VI.41а, чувствительны к нагрузкам обтекания, максимальное избыточное давление является наиболее важным фактором их повреждения. В этом случае расстояния от эпицентра взрыва, на которых объекты получают определенные повреждения, связаны с мощностью взрыва посредством знакомого нам закона подобия (см. § III.86 и далее). Для сооружений, чувствительных к нагрузкам, возникающим от действия скоростного напора (см рис. VI.41б и в), этот закон подобия не применим (см. § III.66) Однако если возникает необходимость в оценке действия взрывов, мощность которых превышает 20 млн. *т* (максимальная мощность, указанная на диаграммах), то закон подобия может быть распространен и на сооружения, чувствительные к нагрузкам от скоростного напора, при условии, что в качестве эталонного взрыва будет принят взрыв мощностью в 20 млн. *т*. Следовательно, если d — расстояние от эпицентра взрыва мощностью $W > 20$ млн. *т*, на котором объекты получат повреждения определенной степени, и d_0 — соответствующее расстояние для взрыва мощностью $W = 20$ млн. *т*, то

$$\frac{d}{d_0} = \left(\frac{W}{20}\right)^{1/3}; \; d = \frac{W^{1/3}}{2{,}71} d_0.$$

Так как значение d_0 может быть получено из диаграммы, то величина d для взрыва мощностью $W > 20$ млн. *т* может быть легко вычислена.

VI.45. В заключение следует упомянуть, что данные диаграмм получены без учета повреждений, вызываемых пожарами. Вообще

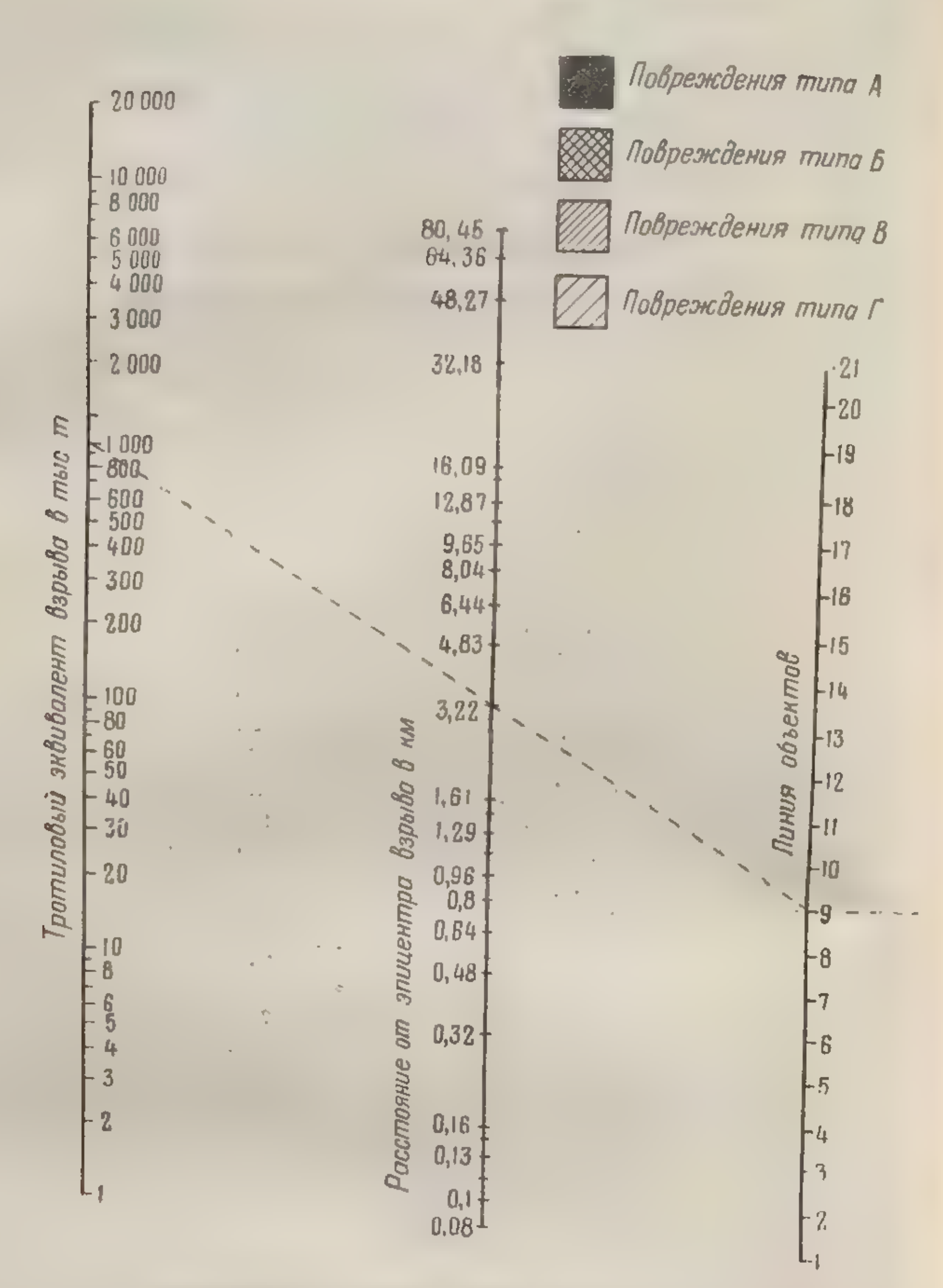


Рис. VI.41а. Зависимость степени повреждений объектов от расстояния до эпицентра взрыва (для объектов, малочувствительных к воздействию скоростного напора)

К рис. VI. 41а.

1 КОЛОНКА | 2 КОЛОНКА | 3 КОЛОНКА | 4 КОЛОНКА | 5 КОЛОНКА | 6 КОЛОНКА | 7 КОЛОНКА | 8 КОЛОНКА | 9 КОЛОНКА | 10 КОЛОНКА

ТИП ОБЪЕКТОВ

Колонки: 1 — Взрыво-устойчивое железобетонное сооружение без окон
2 — Многоэтажное здание с массивными несущими стенами
3 — Многоэтажное здание с железобетонными каркасом и стенами (с небольшой площадью оконных проемов)
4 — Многоэтажный кирпичный жилой дом с несущими стенами
5 — Дом с деревянным каркасом
6 — Резервуар для хранения нефтепродуктов (заполненный)
7 — Легкое сводчатое сооружение из волнистой стали с грунтовой обсыпкой толщиной около 1 *м*
8 — Легкое поверхностное или котлованное убежище из железобетона с грунтовой обсыпкой толщиной около 1 *м*
9 — Транспортные самолеты, находящиеся на аэродроме (повреждения ударной волной)
10 — Торговые суда (повреждения ударной волной)

В подколонках чередуются: в 1-й подколонке — НВ, во второй — ВВ

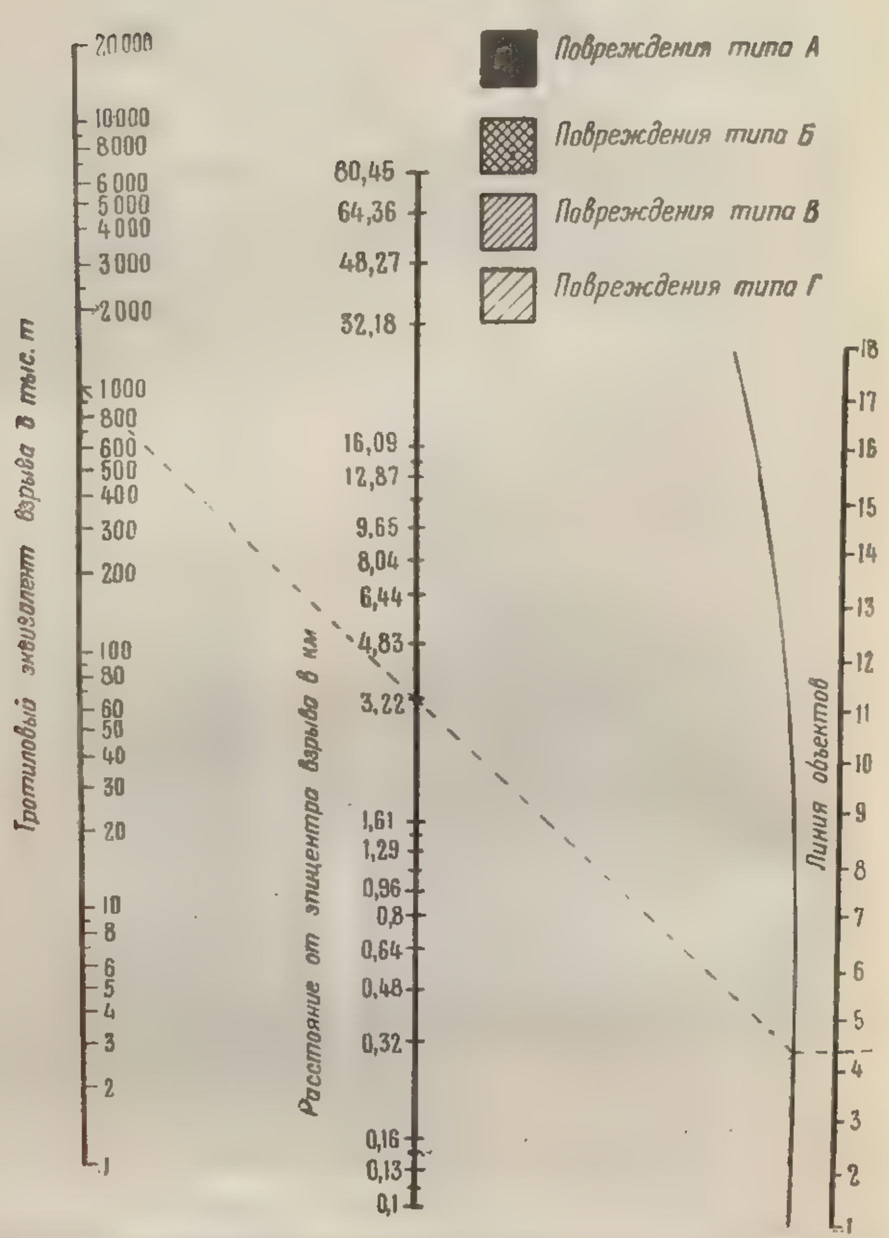
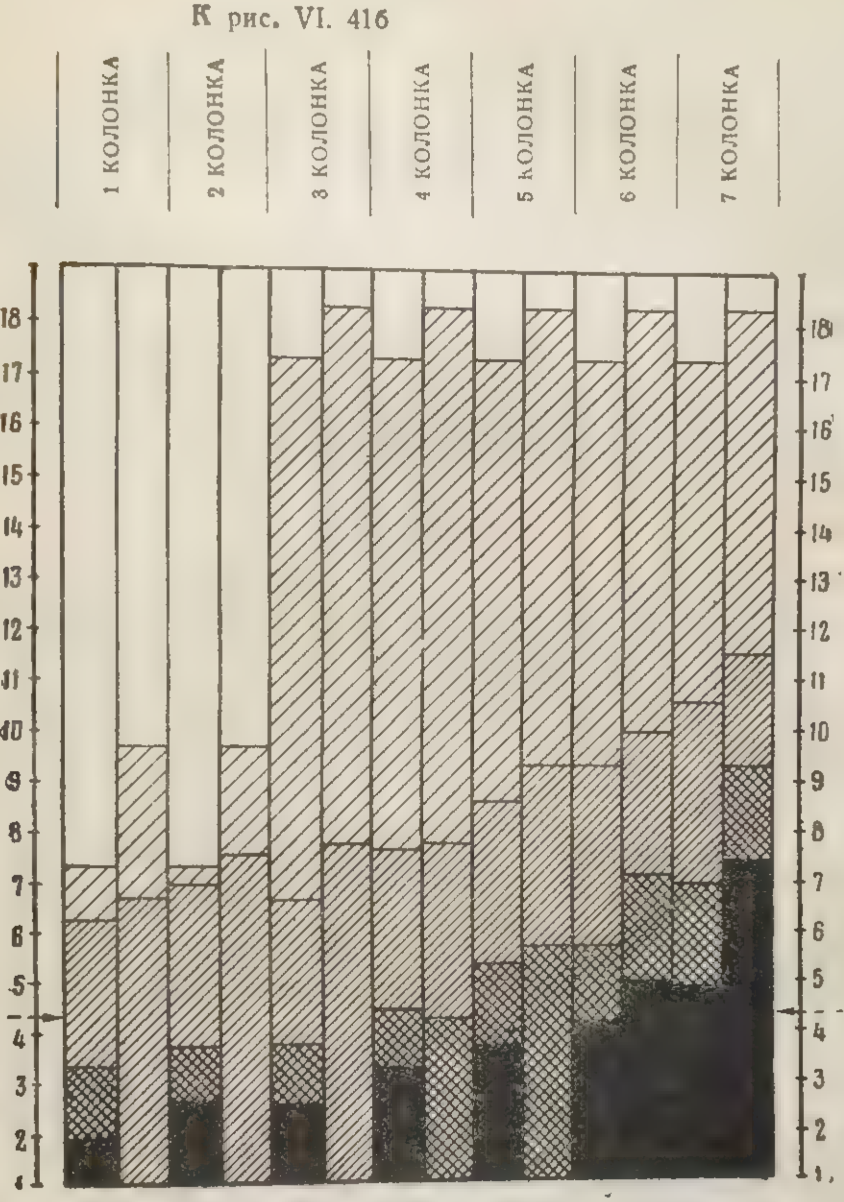


Рис. VI.41б. Зависимость степени повреждения объектов (зданий и мостов) от расстояния до эпицентра взрыва (для объектов, чувствительных к воздействию скоростного напора)

К рис. VI. 41б



ТИП ОБЪЕКТОВ

Колонки:

1 — Шоссейный или железнодорожный мост со сквозными фермами и пролетом 45—75 *м* (взрыв в направлении, перпендикулярном оси моста)
2 — Шоссейный или железнодорожный мост со сквозными фермами и пролетом 75—170 *м* (взрыв в направлении, перпендикулярном к оси моста)
3 — Многоэтажное здание с железобетонным каркасом и легкими стенами
4 — Одноэтажное промышленное здание с тяжелым стальным каркасом и легкими стенами
5 — Многоэтажное административное здание со стальным каркасом и легкими стенами
6 — Одноэтажное промышленное здание с средним по прочности стальным каркасом и легкими стенами
7 — Одноэтажное промышленное здание с легким стальным каркасом и легкими стенами

В подколонках чередуются: в 1-й подколонке — НВ, во второй — ВВ

Номограмма и диаграмма (рис. VI.41а) дают возможность определить характер повреждений различных сооружений, вызываемых избыточным давлением на заданном расстоянии от эпицентра, для взрыва заданной мощности. Буквы А, Б, В и Г на диаграмме обозначают степень повреждения, как это было указано выше. Сокращения НВ и ВВ в верхней части каждой диаграммы обозначают соответственно наземный (надводный) и воздушный взрывы.

Метод расчета. Приведенная на рис. VI.41 диаграмма может быть использована непосредственно для определения повреждений, вызываемых взрывами мощностью от 1 тыс. *т* до 20 млн. *т*. При взрыве мощностью более 20 млн. *т* используется зависимость

$$d = \frac{W^{1/3}}{2{,}71} d_0,$$

где d — расстояние от эпицентра, на котором объекты получают повреждения заданного типа от действия взрыва мощностью $W > 20$ млн. *т*;

d_0 — расстояние от эпицентра, на котором объекты получают те же повреждения от действия взрыва мощностью 20 млн. *т*.

Пример. Дано: произведен воздушный взрыв ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* ($W = 1$ млн. *т*).

Определить характер повреждений, которые получат на расстоянии 3,2 *км* от эпицентра взрыва: а) взрывоустойчивые железобетонные сооружения, б) железобетонные сооружения обычного типа, в) сооружения с деревянным каркасом.

Решение: Находим положения точек, соответствующих на левой шкале мощности взрыва 1 млн. *т* и на средней шкале — расстоянию 3,2 *км*. Через эти две точки проводим прямую линию до пересечения с правой шкалой (линией объектов). От точки пересечения проводим горизонтальную линию, пересекающую полосы диаграммы, показывающие типы повреждения.

Таким путем определяем:

а) взрывоустойчивые железобетонные здания в основном не будут иметь каких-либо повреждений;

б) обычные железобетонные сооружения получат повреждения типа Б;

с) дома с деревянным каркасом получат повреждения типа А, т. е. они будут полностью разрушены.

Номограммы и диаграммы (рис. VI.41б и в) дают возможность определить характер повреждений сооружений, чувствительных к нагрузкам от скоростного напора на заданном расстоянии от эпицентра взрыва заданной мощности. Буквы А, Б, В и Г на диаграммах, как и прежде, обозначают тип повреждений. Сокращения НВ и ВВ обозначают соответственно наземный и воздушный взрывы.

Метод расчета. При взрывах мощностью более 20 млн. *т* применим тот же самый закон подобия, как и для сооружений, чувствительных к нагрузкам обтекания.

Пример. Дано: произведен воздушный взрыв ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*.

Определить характер повреждений, которые будут получать на расстоянии 3,2 *км* от эпицентра: а) мосты со сквозными фермами, б) промышленные сооружения со стальным каркасом средней прочности, в) воздушные линии электропередачи и линии связи.

Решение: Определяем положения точек, соответствующих тротиловому эквиваленту 1 млн. *т* (на левой шкале) и расстоянию, равному 3,2 *км* (на центральной шкале). Через эти две точки проводим прямую линию до пересечения с правой шкалой (линией объектов). Из точки пересечения на правой шкале проводим горизонтальную линию через полосы диаграммы, показывающие типы повреждений.

Таким путем определяем:

а) мосты со сквозными фермами независимо от их длины будут иметь повреждения типа В;

б) промышленные сооружения (средней прочности) со стальным каркасом будут иметь повреждения типа А;

в) воздушные линии электропередачи и линии связи будут иметь повреждения типа А, независимо от того, ориентированы эти линии радиально или перпендикулярно относительно направления распространения ударной волны.

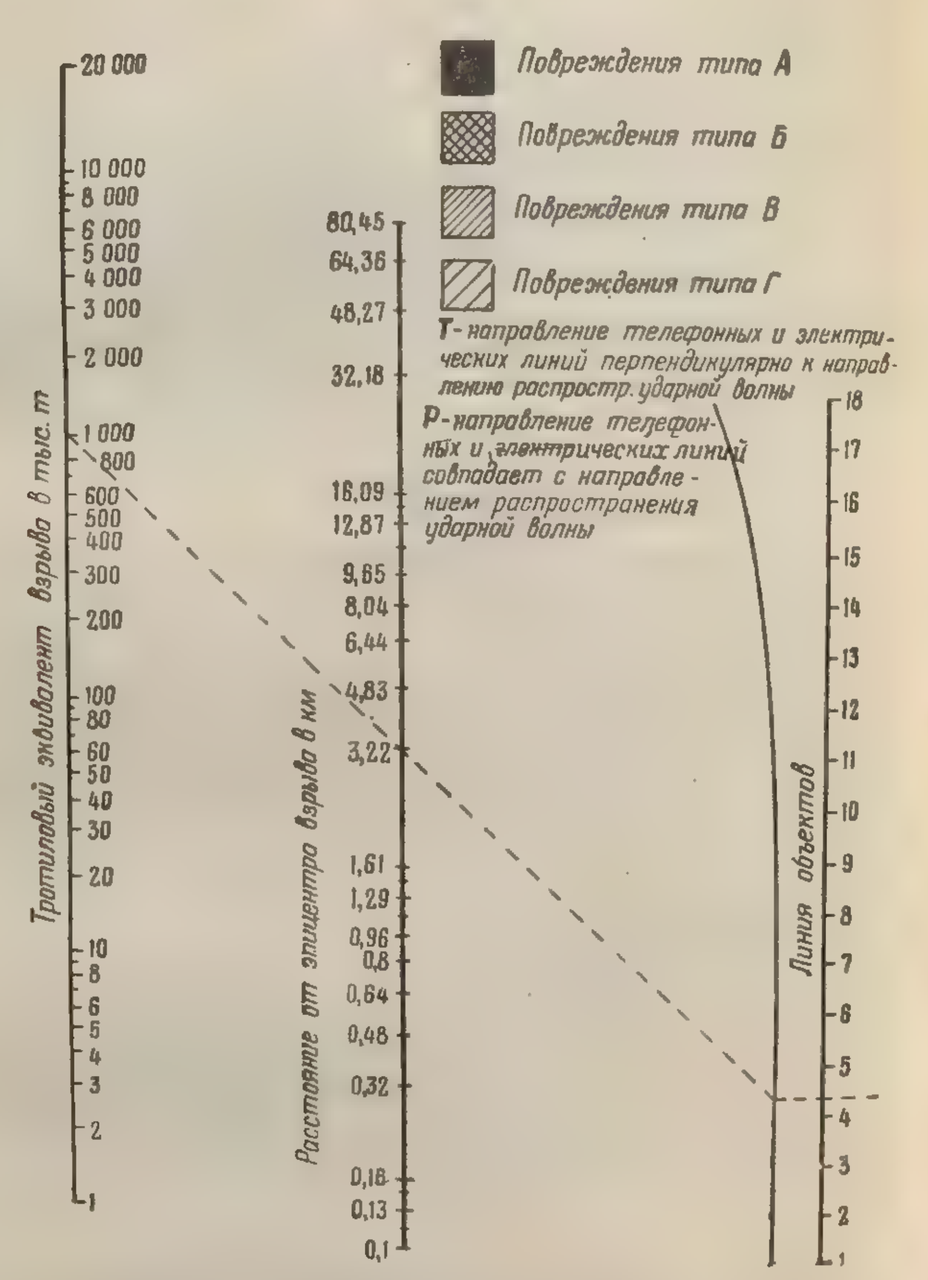


Рис. VI.41в. Зависимость степени повреждений объектов (не зданий) от расстояния до эпицентра взрыва (для объектов, чувствительных к воздействию скоростного напора)

К рис. VI. 41в

1 КОЛОНКА | 2 КОЛОНКА | 3 КОЛОНКА | 4 КОЛОНКА | 5 КОЛОНКА | 6 КОЛОНКА | 7 КОЛОНКА | 8 КОЛОНКА | 9 КОЛОНКА

ТИП ОБЪЕКТОВ

Колонки:

1 — Дизельные и паровые железнодорожные локомотивы (ориентированы параллельно направлению распространения ударной волны)
2 — Дизельные и паровые железнодорожные локомотивы (ориентированы перпендикулярно направлению распространения ударной волны)
3 — Железнодорожный подвижной состав
4 — Автомобильный транспорт
5 — Транспортные самолеты, находящиеся на аэродроме (повреждения от светового излучения)
6 — Лесные массивы (440 деревьев на 1 *га*)
7 — Телефонные и электрические линии
8 — Мачты радио- и телевизионных станций высотой 60—75 *м*
9 — Торговые суда в гавани (подводный взрыв)

В подколонках чередуются: в 1-й подколонке — НВ, во второй — ВВ, в последних двух подколонках — ПВ

говоря, если не считать самолетов с тканевой обшивкой, данные для которых имеются на диаграмме, то непосредственное действие светового излучения на рассматриваемые объекты не будет иметь существенного значения. Световое излучение может, однако, вызвать пожары; в сооружениях, получивших повреждения типа А, Б и В, пожары могут возникнуть в результате повреждения газопроводов и электропроводки. В некоторых случаях (что наблюдалось в Хиросима) пожары могут охватить районы города даже за пределами зоны значительных разрушений, вызванных ударной волной. Распространение таких пожаров зависит в большой степени от местных условий, погоды и других условий, и поэтому характер распространения пожаров трудно предсказать. Эти соображения следует иметь в виду при использовании диаграмм для оценки характера разрушений какого-либо города или отдельного объекта.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ОБЪЕКТАМИ[1]

Возникновение нагрузок от ударной волны

VI.46. Так как получение данных о действии ядерных взрывов на различные сооружения сопряжено со значительными трудностями, то обычным методом определения степени повреждений сооружений, вызываемых воздушной ударной волной, является теоретический анализ, подкрепленный лабораторными данными и данными экспериментов. Первым этапом такого анализа является определение нагрузок от воздушной ударной волны на конструкцию сооружения с последующей оценкой реакции конструкции на эти нагрузки. Так как конструкции реальных сооружений обычно очень сложны, то все приведенные здесь данные будут относиться к упрощенным схемам.

VI.47. Нагрузка на объект, создаваемая воздушной ударной волной, как это указано в главе III, является функцией параметров падающей ударной волны (величины максимального избыточного давления, скоростного напора, закона изменения давления во времени и длительности действия ударной волны), а также размеров, формы, ориентации и сопротивляемости объекта. Взаимодействие падающей ударной волны с различными объектами представляет собой сложный процесс, теория которого основывается главным образом на экспериментах, произведенных в аэродинамических трубах и взрывных камерах. Чтобы упростить сложную задачу определения нагрузки, вводятся следующие допущения: 1) величина избыточного давления, представляющая практический интерес, не превосходит 3,5 $кг/см^2$; 2) объект находится в области образования головной ударной волны.

[1] Эти разделы до конца данной главы при чтении могут быть опущены.

VI.48. Чтобы получить общее представление о процессе нагружения конструкций под действием воздушной ударной волны, в качестве примера рассмотрим простой объект, а именно: куб, передняя грань которого обращена в сторону взрыва и перпендикулярна направлению движения фронта ударной волны. Будем считать далее, что куб прочно связан с основанием и остается неподвижным в процессе нагружения. Далее принимается, что фронт ударной волны имеет такие размеры по сравнению с размерами куба, что его можно считать при набегании на куб плоским. Тогда рассматриваемое давление будет средним давлением, действующим на данную грань куба. Так как этот объект находится в дальней зоне (в области нерегулярного отражения), то фронт ударной волны перпендикулярен к поверхности земли (рис. VI.48).

VI.49. Когда ударная волна достигает передней грани куба, происходит ее отражение, в результате чего возникает избыточное давление отражения, которое может превышать в 2—8 раз избыточное давление в падающей волне (см. § III.81). Вслед за этим ударная волна начинает обтекать куб, оказывая давление на его боковые и верхнюю грани, а затем и на заднюю грань куба. В результате объект оказывается погруженным в область высокого давления ударной волны, которое постепенно уменьшается во времени и в конечном счете становится равным атмосферному давлению. Так как давление отражения, действующее на переднюю грань куба, больше, чем давление ударной волны на верхнюю и боковые грани, то оно не может сохраняться долгое время и вскоре падает до величины **застойного давления**, которое представляет собой сумму избыточного давления падающей волны и скоростного напора (давления торможения). Время ослабления давления приблизительно равно времени, в течение которого волна разрежения пройдет расстояние от ребер передней грани куба до ее центра и обратно.

VI.50. Давление, действующее на боковые и верхнюю грани куба, равно избыточному давлению в падающей волне, когда фронт волны достигает этих граней. Затем следует короткий период действия пониженного давления, вызываемого завихрением, образующимся в процессе обтекания передних ребер куба. Это завихрение движется за фронтом ударной волны вдоль или вблизи поверхности (рис. VI.50). После прекращения действия завихрения давление становится равным давлению в падающей ударной волне и затем постепенно уменьшается со временем. Воздушный поток вызывает некоторое уменьшение нагрузок, действующих на верхнюю и боковые грани куба, потому что, как мы увидим ниже, коэффициент торможения имеет здесь отрицательное значение.



Рис. VI.48. Подход ударной волны к жестко закрепленному простейшему объекту, имеющему форму куба

VI.51. Достигнув заднего ребра куба, ударная волна обтекает его и движется вдоль задней грани куба (рис. VI.51). Для того чтобы давление приобрело более или менее постоянное значение, равное алгебраической сумме избыточного давления и давления торможения (последнее имеет здесь также отрицательное значение), требуется определенное время. Оно зависит от времени, необходимого для прекращения действия завихрения, образующегося в процессе обтекания волной заднего ребра куба и времени, необходимого для прохождения ударной волной расстояния от заднего ребра куба до центра его задней грани.



Рис. VI.50. Движение воздушной ударной волны над верхней и боковыми гранями куба



Рис. VI.51. Обтекание воздушной ударной волной тыльной грани куба

VI.52. Когда избыточное давление на задней стороне куба достигнет величины избыточного давления ударной волны, процесс обтекания на этом заканчивается. Таким образом, следует считать, что более или менее устойчивые условия возникают еще до того, как давление приобретает значение, которое имела окружающая среда до прихода ударной волны.

VI.53. Общая нагрузка, действующая на любую грань куба, равна алгебраической сумме соответствующего избыточного давления $p(t)$ и давления торможения. Последнее связано со скоростным напором $q(t)$ выражением

$$\text{Давление торможения} = C_d q(t),$$

где C_d называется **коэффициентом торможения**, величина кототорого зависит от ориентации данной стороны куба относительно направления движения фронта ударной волны; этот коэффициент может быть положительным или отрицательным. Величины $p(t)$ и $q(t)$ представляют собой избыточное давление и скоростной напор в любой момент времени t после достижения заданной точки фронтом ударной волны (см. § III.82 и III.83).

VI.54. Вышеприведенные рассуждения относятся к нагрузкам, действующим на любую поверхность. Для какой-либо определен-

ной точки на поверхности величина нагрузки зависит также от положения данной точки относительно краев грани куба. Этот случай требует более детального рассмотрения.

Следует отметить, что здесь была дана только общая характеристика процесса возникновения нагрузки. В действительности, однако, в процессе обтекания образуется несколько циклов волн отражения и волн разрежения, распространяющихся вдоль поверхностей, пока не произойдет их затухание. Однако для практических расчетов по определению степени повреждения сооружений эти колебания величины давления не имеют существенного значения.

Влияние размеров объекта на процесс образования нагрузки

VI.55. Нагрузка, действующая на каждую отдельную поверхность, часто не имеет существенного значения по сравнению с результирующей горизонтальной нагрузкой, действующей на объект в целом. Следовательно, необходимо изучить влияние результирующей нагрузки, величина которой равна разности значений нагрузок, действующих на переднюю и заднюю грани куба. Результирующая горизонтальная нагрузка, действующая на преграду в процессе обтекания, имеет большую величину, так как давление на переднюю грань в первоначальный момент, до установления режима обтекания, представляет собой давление отражения.

VI.56. Когда процесс обтекания закончится, нагрузки, вызываемые избыточным давлением, действующим на передние и задние грани куба, будут в основном равны. Результирующая горизонтальная нагрузка к этому моменту времени значительно уменьшится и будет равна разности значений нагрузок, приложенных к передней и задней граням, образовавшейся в результате действия скоростного напора. Вследствие того, что время обтекания зависит от размеров объекта, а не от продолжительности действия падающей воздушной волны, импульс нагрузки на единицу площади в процессе обтекания больше для длинных, чем для коротких объектов.

VI.57. С другой стороны, на величину нагрузки торможения оказывают влияние форма объекта и длительность действия воздушной волны. Именно последняя величина, а не размеры объекта определяют время действия и значение импульса нагрузки торможения на единицу площади.

VI.58. Из сказанного выше можно сделать вывод, что для крупных объектов, подверженных воздействию ударной волны с относительно небольшой продолжительностью действия, результирующая горизонтальная нагрузка, приложенная к объекту в процессе обтекания, имеет большее значение, чем нагрузка от скоростного напора. По мере уменьшения размеров объекта или по мере увеличения продолжительности действия ударной волны, т. е. увеличения

тротилового эквивалента ядерной бомбы, нагрузки от скоростного напора приобретают все большее значение. При классификации повреждений для того, чтобы указать на главный фактор, вызывающий эти повреждения, объекты часто считают «чувствительными к нагрузкам обтекания» (к избыточному давлению) или «чувствительными к нагрузкам торможения» (к скоростному напору) (см. гл. III). В действительности, однако, повреждения всех объектов вызываются суммарным воздействием обоих видов нагрузки.

Влияние формы объекта на процесс образования нагрузки

VI.59. Рассмотренные выше принципы взаимодействия ударной волны с объектом, имеющим форму куба, могут быть распространены на случаи нагружения объектов любой другой формы. Коэффициент отражения, то есть отношение мгновенного избыточного давления отражения к избыточному давлению во фронте падающей ударной волны, зависит от угла ее падения. Для объектов с криволинейными поверхностями, например со сферической, отражение на передней поверхности будет неодинаковым для различных точек. Время спада давления отражения до уровня застойного давления зависит от размеров объекта и положения рассматриваемой точки на передней поверхности.

VI.60. Коэффициент торможения, т. е. отношение давления торможения к скоростному напору (см. § VI.53), изменяется в зависимости от формы объекта. Во многих случаях дается средний коэффициент торможения, так что действующая на поверхность суммарная нагрузка может быть подсчитана. В других случаях для определения давления в различных точках поверхности необходимо знать частные значения этих коэффициентов. Время нарастания давления до среднего значения на задней поверхности объекта зависит от размера, а также в известной степени и от формы объекта.

VI.61. Некоторые сооружения имеют непрочные части, которые легко разрушаются в первый же момент соприкосновения ударной волны с поверхностью объекта, что приводит к изменению формы объекта, а следовательно, и действующей на него нагрузки. Когда, например, выбиваются стекла в окнах обычного здания, то ударная волна, попадая в здание, выравнивает давление внутри и снаружи здания. При проектировании новых сооружений иногда целесообразно предусматривать в них такие слабые части, чтобы уменьшить повреждение сооружения в целом. Таким образом, реакция отдельных элементов сооружения может оказать влияние на величину нагрузки на сооружение в целом. Вообще считается, что смещение элементов конструкции не влияет на величину нагрузки от воздушной ударной волны на этот элемент. Однако исключением из этого правила являются самолеты, испытывающие воздействие ударной волны в полете.

Графики изменения нагрузки во времени

VI.62. Ниже излагаются методы построения графиков, показывающих изменение нагрузки от ударной волны как функцию от времени. Эти методы построения графиков рассчитаны на следующие четыре сравнительно простые формы сооружений: 1) замкнутое сооружение прямоугольной формы, 2) частично открытое сооружение прямоугольной формы, 3) открытое каркасное сооружение, 4) цилиндрическое сооружение.

Для объектов, имеющих сходные формы с перечисленными выше, в методы построения графиков необходимо внести только некоторые изменения. Для объектов, имеющих значительно отличающуюся форму, на основе указанных методов можно произвести лишь весьма приближенную оценку ожидаемой нагрузки от действия ударной волны.

VI.63. Характеристики воздушной ударной волны, которые могут потребоваться для расчетов, а также их буквенные обозначения приведены в табл. VI.63. В этой же таблице указаны номера рисунков главы III, на которых даны графики, позволяющие определить эти параметры для заданных расстояний от эпицентра взрыва данной мощности.

Таблица VI.63

Характеристики воздушной ударной волны, необходимые для расчета нагрузки

Параметр	Обозначение	Источник
Максимальное избыточное давление	p	Рис. III.94а, б
Изменение избыточного давления во времени	$p(t)$	Рис. III.82
Максимальный скоростной напор	q	Рис. III.95
Изменение скоростного напора во времени	$q(t)$	Рис. III.82
Давление отражения	p_r	Рис. III.80 (или III.81.1)
Продолжительность положительной фазы	t_+	Рис. III.96
Скорость перемещения фронта ударной волны	U	Рис. III.80

Замкнутые сооружения прямоугольной формы

VI.64. Замкнутые сооружения прямоугольной формы могут быть представлены параллелепипедом (рис. VI.64), имеющим длину L, высоту H и ширину B. К этой категории будут относиться сооружения с плоскими крышами и стенами, устойчивость которых будет приблизительно равна устойчивости каркаса. Стены либо совсем не имеют оконных и дверных проемов, либо имеют небольшое количество их (не более 5% общей площади), так что давление внутри сооружения в процессе воздействия нагрузки от ударной волны

остается равным давлению в невозмущенной среде. Чтобы упростить анализ, предположим, как это делалось ранее, что одна сторона сооружения обращена в сторону взрыва и перпендикулярна к направлению распространения ударной волны. Эта сторона назы-

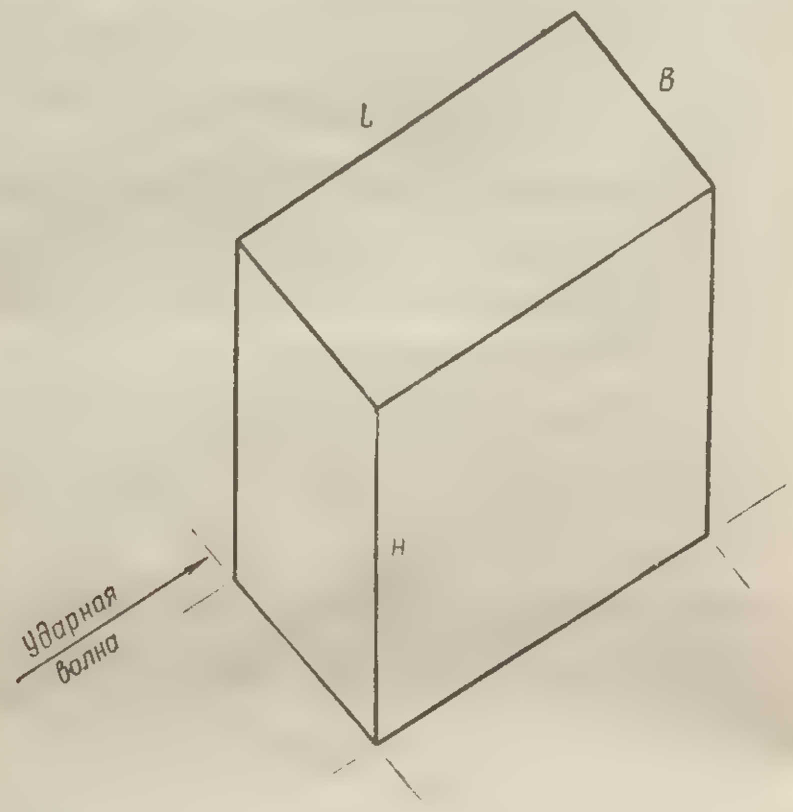


Рис. VI.64. Схема замкнутого прямоугольного сооружения

вается передней стенкой сооружения. Ниже построены графики нагрузок: а) для передней стенки, б) для боковых и верхней стенок и в) для задней стенки. Суммируя величины средних нагрузок, полученные для передней и задней стенок, получаем результирующую горизонтальную нагрузку (рис. VI.68).

VI.65. а) **Определение средней нагрузки, действующей на переднюю стенку.** Вначале определяют давление отражения p_r. При этом получают давление в момент времени $t = 0$ (когда фронт воздушной волны достигает передней стенки (рис. VI.65). Затем вычисляют время t_s — время возникновения застойного давления p_s. Лабораторными исследованиями установлено, что t_s может быть с достаточной степенью приближения определено из выражения

$$t_s = \frac{3S}{U},$$

где S равно H, или $0{,}5B$, в зависимости от того, какая величина меньше. Коэффициент торможения для передней стенки равен единице, поэтому давление торможения в данном случае равно скоростному напору. Тогда застойное давление равно

$$p_s = p(t_s) + q(t_s),$$

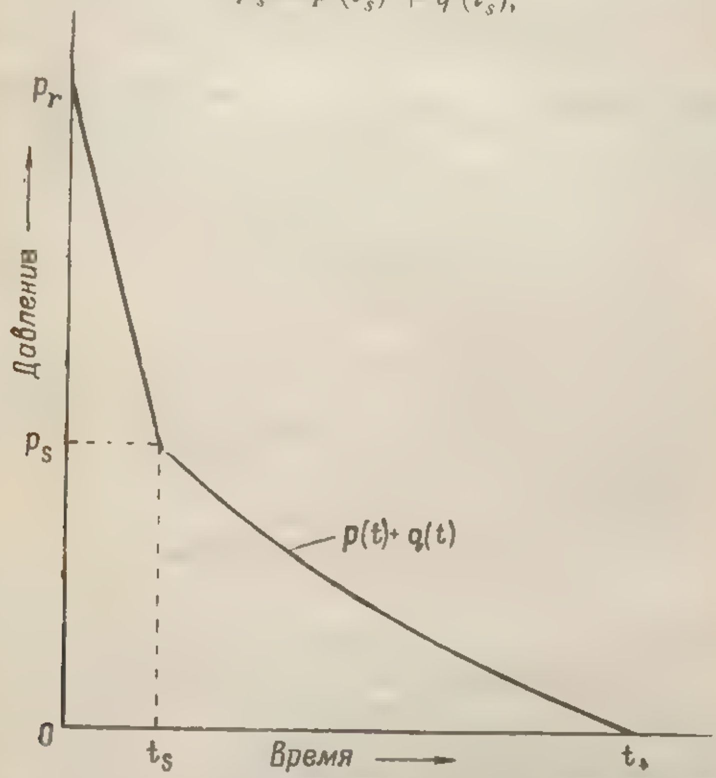


Рис. VI.65. Средняя нагрузка на переднюю стенку замкнутого прямоугольного сооружения

где $p(t_s)$ и $q(t_s)$ представляют собой соответственно избыточное давление и скоростной напор в момент времени t_s. Далее, с течением времени давление падает и в момент времени t оно равно

$$p_t = p(t) + q(t),$$

где t представляет собой момент времени между t_s и t_+. Таким образом, изменение давления во времени для передней стенки может быть представлено в виде графика, показанного на рис. VI.65.

VI.66. б) **Определение средней нагрузки на боковые стенки и крышу сооружения.** Хотя нагрузка начинает действовать немедленно после того, как воздушная ударная волна достигнет передней стенки, т. е. в момент времени $t = 0$, боковые и верхняя грани параллелепипеда остаются не нагруженными полностью до того момента, пока фронт ударной волны не пройдет расстояние L,

т. е. когда $t = \frac{L}{U}$. Среднее давление p_a в этот момент времени равно избыточному давлению плюс нагрузка торможения на расстоянии $\frac{L}{2}$, тогда

$$p_a = p\left(\frac{L}{2U}\right) - \frac{q}{2}\left(\frac{L}{2U}\right).$$

Коэффициент торможения для боковых стенок и крыши сооружения равняется 0,5. Нагрузка, следовательно, увеличивается от 0 в момент времени $t = 0$ до величины p_a в момент времени $\frac{L}{U}$, как

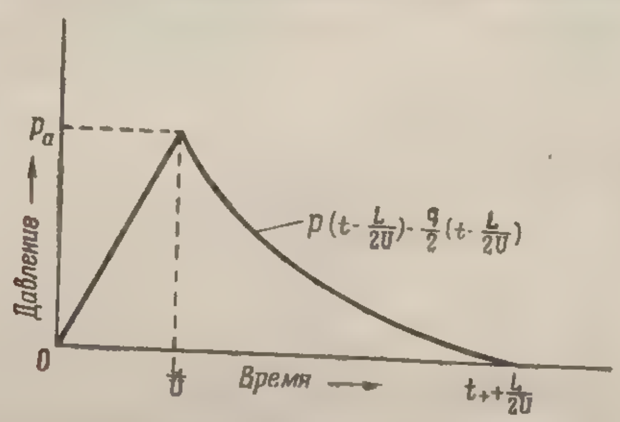


Рис. VI.66. Средняя нагрузка на боковые и верхнюю стенки замкнутого прямоугольного сооружения

показано на рис. VI.66. После этого давление в любой момент времени может быть найдено из выражения

$$p_t = p\left(t - \frac{L}{2U}\right) - \frac{q}{2}\left(t - \frac{L}{2U}\right),$$

где t лежит в интервале между $\frac{L}{U}$ и $t_+ + \frac{L}{2U}$, как это показано на рис. VI.66.

Избыточное давление и скоростной напор соответственно берутся для момента времени $t - \frac{L}{2U}$.

VI.67. в) **Определение величины средней нагрузки на заднюю стенку.** Фронт ударной волны достигает задней стенки в момент времени $\frac{L}{U}$, но требуется еще дополнительное время $\frac{4S}{U}$ для того, чтобы давление достигло величины $p_в$ (рис. VI.67). Здесь, как и раньше, S равно H, или $0{,}5B$, в зависимости от того, какая из этих величин меньше. Коэффициент торможения на задней стенке равен 0,5, так что давление в любой момент времени после того,

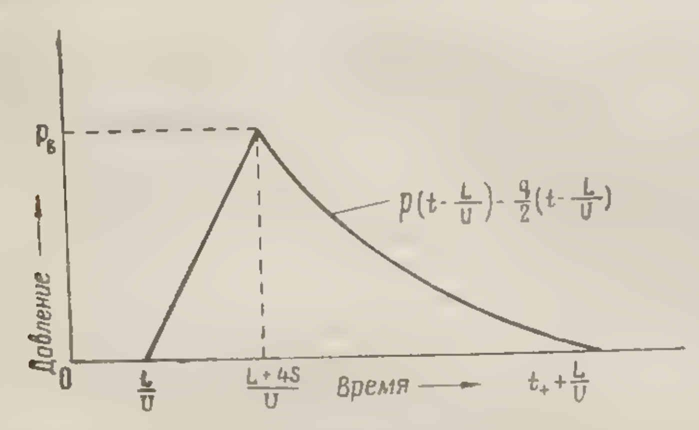


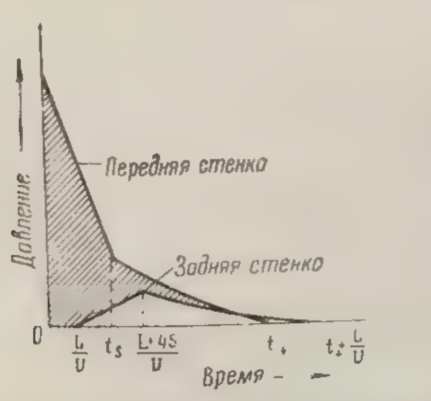
Рис. VI.67. Средняя нагрузка на заднюю стенку замкнутого прямоугольного сооружения

как оно возрастет до величины $p_в$, может быть представлено выражением

$$p_t = p\left(t - \frac{L}{U}\right) - \frac{q}{2}\left(t - \frac{L}{U}\right),$$

где t лежит в интервале между $\frac{L+4S}{U}$ и $t_+ + \frac{L}{U}$, как это видно на рис. VI.67.

VI.68. г) **Результирующая горизонтальная нагрузка.** Результирующая горизонтальная нагрузка равна разности нагрузок на переднюю и заднюю стенки. Определение разности нагрузок лучше всего производить графически, как показано на рис. VI.68. На рисунке с левой стороны изображены отдельно графики нагрузок на переднюю и заднюю стенки, построенные соответственно на основе рис. VI.65 и VI.67. Разность нагрузок, представленная в виде заштрихованной области, переносится затем на правую сторону для



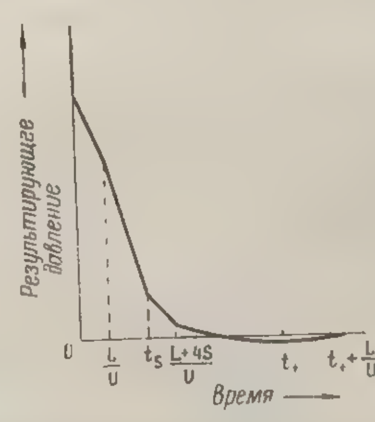


Рис. VI.68. Результирующая горизонтальная нагрузка на замкнутое прямоугольное сооружение

определения результирующего давления. Результирующая нагрузка необходима для определения реакции каркасных конструкций. Реакция же поверхностей определяется главным образом нагрузками на отдельные стенки.

Частично открытое прямоугольное сооружение

VI.69. К такому типу относятся сооружения, у которых передняя и задняя стенки имеют отверстия или оконные проемы, занимающие до 30% общей площади. Как и в предыдущем случае, нагрузка определяется отдельно: а) для передней стенки, б) для бо-

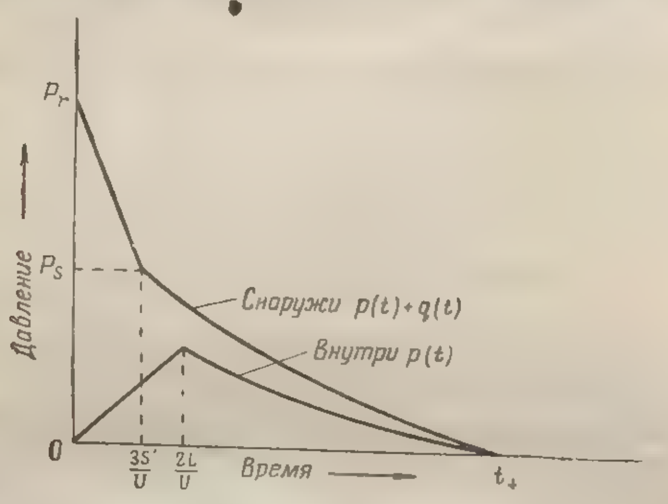


Рис. VI.71. Средняя нагрузка на переднюю стенку частично открытого прямоугольного сооружения

ковых стенок и крыши, в) для задней стенки, г) результирующая горизонтальная нагрузка. Так как в этом случае ударная волна проникает внутрь сооружения, то можно считать, что графики изменения нагрузки во времени могут быть применены как для внутренних, так и для наружных частей сооружений.

VI.70. а) **Средняя нагрузка на переднюю стенку.** Нагрузка, приложенная к наружной стороне сооружения, вычисляется тем же способом, какой был использован для замкнутых сооружений, за исключением того, что величина S заменяется величиной S', представляющей собой среднее расстояние для всей поверхности в целом от центра секции передней стенки до края отверстия или проема. Это среднее расстояние, которое должны пройти волны разрежения на передней стенке, чтобы уменьшить отраженное давление до величины застойного давления.

VI.71. Давление на внутреннюю поверхность передней стенки начинает возрастать в начальный момент времени, потому что воздушная волна немедленно проникает внутрь сооружения через

имеющиеся отверстия. Чтобы это давление достигло величины избыточного давления ударной волны, должен пройти промежуток времени $\frac{2L}{U}$. Следовательно, внутреннее давление в любой момент времени t равно $p(t)$. Принимается, что скоростной напор внутри сооружения настолько мал, что им можно пренебречь. Изменение внутреннего и наружного давления во времени показано на рис. VI.71.

VI.72. б) **Средняя нагрузка на боковые стенки и крышу сооружения.** Величина внешнего давления на стенки и крышу сооружения определяется как и для замкнутого сооружения, но для того, чтобы внутреннее давление достигло значения избыточного давления в ударной волне, требуется, как и для случая с передней стен-

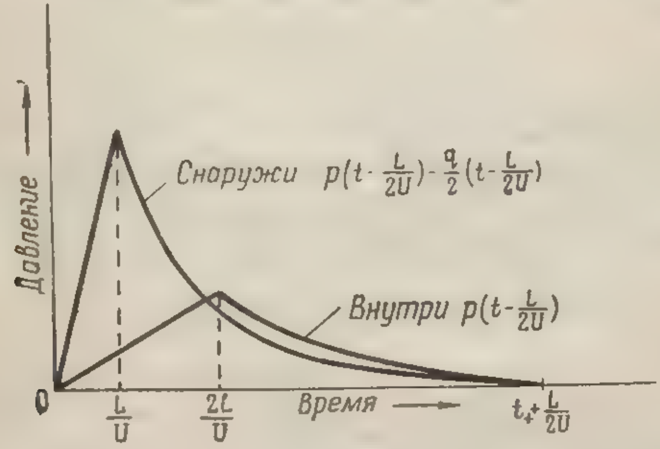


Рис. VI.72. Средняя нагрузка на боковые и верхнюю стенки частично открытого прямоугольного сооружения

кой, время $\frac{2L}{U}$. Здесь следует пренебречь влиянием скоростного напора внутри сооружения, а также влиянием отверстий на боковых стенках. Учесть влияние отверстий на величину нагрузки в этом случае не представляется возможным. Графики изменения нагрузок показаны на рис. VI.72.

VI.73. в) **Средняя нагрузка на заднюю стенку.** Наружное давление определяется так же, как и для замкнутых сооружений, за исключением того, что величина S, как и выше, заменяется величиной S'. Внутреннее давление, отраженное от внутренней поверхности задней стенки, достигает величины избыточного давления воздушной волны в момент времени $\frac{L}{U}$ и затем падает до величины $p\left(t-\frac{L}{U}\right)$. Как и ранее, из-за малой величины скоростного напора его влиянием можно пренебречь (рис. VI.73). Графики на

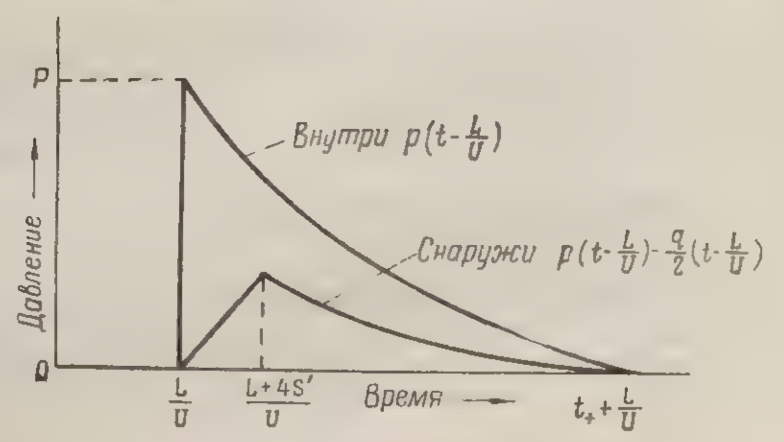


Рис. VI.73. Средняя нагрузка на заднюю стенку частично открытого прямоугольного сооружения

рис. VI.73 построены в предположении, что в сооружении не имеется перегородок, влияющих на движение ударной волны.

VI.74. г) **Результирующая горизонтальная нагрузка** равна разности нагрузок на переднюю стенку, снаружи и внутри, минус результирующая нагрузка на заднюю стенку.

Открытые решетчатые сооружения

VI.75. Сооружения, в которых воздействию ударной волны подвержены отдельные элементы, например мосты со сквозными фермами, следует рассматривать как открытые каркасные сооружения. Административные здания со стальным каркасом с большой площадью остекления или промышленные здания с стеновым заполнением из асбоцементных, легких стальных или алюминиевых панелей в первый же момент воздействия на них ударной волны также превращаются в открытую решетчатую конструкцию.

VI.76. Точную величину нагрузки, которая передается указанными элементами стенового заполнения до их разрушения каркасу здания, определить очень трудно. В случае, если стены здания почти полностью остеклены, величиной этой нагрузки, под действием которой выбиваются стекла, можно пренебречь. В тех случаях, когда стеновые панели изготовлены из асбоцемента, волнистой стали или алюминиевых листов, приблизительная величина нагрузки, передаваемой на каркас здания, эквивалентна импульсу $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ *кгсек/см*². В зависимости от размеров и прочности панелей они, по-видимому, не разрушаются, если максимальное избыточное давление не превышает 0,14 *кг/см*². В этом случае каркасу здания передается полная нагрузка, вызываемая действием воздушной волны.

VI.77. Другой трудностью при анализе нагружения открытых каркасных сооружений является определение нагрузок от избыточного давления на отдельные элементы сооружения в процессе обте-

кания его воздушной волной. Так как этот процесс происходит для различных элементов сооружения в разное время и на него оказывает влияние экранирование одних элементов соседними, то весь этот процесс должен быть упрощен. Согласно предлагаемому упрощению возникающая нагрузка рассматривается как импульс, величина которого определяется следующим способом. Импульс нагрузки от избыточного давления определяется для среднего элемента, который рассматривается при этом как замкнутая система, и затем величина импульса умножается на число элементов конструкции. Полученный таким образом импульс считается приложенным к сооружению в момент прихода к нему фронта ударной волны, или он разделяется на два импульса для передней и задней стенок, которые заключают в себе бо́льшую часть несущих элементов конструкции (рис. VI.79).

VI.78. Основная часть нагрузки на открытые решетчатые или каркасные конструкции создается действием скоростного напора. Для отдельных открытых элементов конструкции со швеллерным, двутавровым и угловым поперечным сечением, а также для элементов с прямоугольным поперечным сечением коэффициент торможения равен приблизительно двум. Но так как в решетчатых и каркасных конструкциях различные элементы частично экранируют друг друга, то средний коэффициент лобового сопротивления для фермы (каркаса) в целом считается равным единице. Сила F (давление, умноженное на площадь), действующая на отдельный элемент конструкции, определяется выражением

$$F\ (\text{элемента}) = C_d q\,(t)\,A_i,$$

где $C_d = 2{,}0$, а A_i представляет собой площадь проекции элемента конструкции на плоскость, перпендикулярную направлению распространения ударной волны. Величина нагрузки на ферму (каркас) в целом будет равна

$$F\ (\text{фермы, каркаса}) = C_d q\,(t) \sum A_i,$$

где $C_d = 1{,}0$, а $\sum A_i$ представляет собой суммарную площадь проекций всех элементов фермы (каркаса).

Следовательно, результат может быть записан в виде

$$F\ (\text{фермы, каркаса}) = q\,(t)\,A,$$

где $A = \Sigma A_i$.

VI.79. Изменение нагрузки (силы) во времени для каркаса длиной L, основные элементы которого находятся в плоскостях передней и задней стенок, показано на рис. VI.79. Обозначения на рисунке A_{fW} и $A_{вW}$ представляют собой соответственно площади передней и задней стенок, которые передают нагрузку на каркас до своего разрушения, а величины I_{fm} и $I_{вm}$ представляют собой импульсы нагрузок от избыточного давления соответственно на

элементы передней и задней стенок. Можно заметить, что сила торможения достигает своей полной величины $\left(\frac{L}{2U}\right)$ только по истечении времени $\frac{L}{U}$, т. е. в момент, когда ударная волна достигнет противоположного конца сооружения.

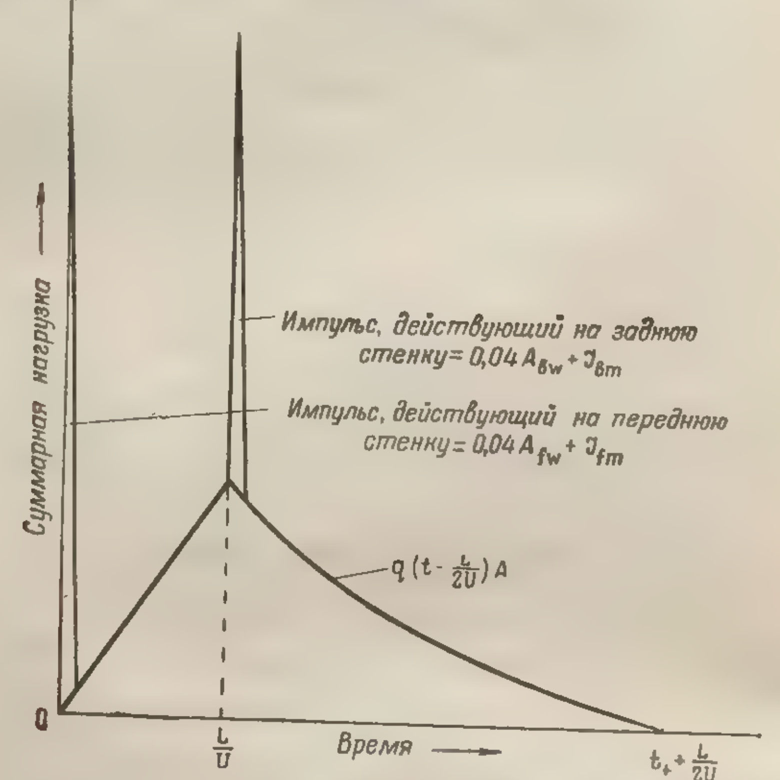


Рис. VI.79. Результирующая горизонтальная нагрузка на открытое каркасное сооружение

Цилиндрические сооружения

VI.80. Анализ, который дается в данном параграфе, можно применить для сооружений с круглым поперечным сечением, например для телефонных столбов и дымовых труб; при этом предполагается, что величина максимального избыточного давления не превышает 2,1 *кг/см²*. Выводы данного параграфа могут быть применены также к сооружениям с полукруглым поперечным сечением, например к заглубленным сооружениям типа землянки, а также в качестве грубого приближения к куполообразным или сферическим сооружениям.

VI.81. Методы определения величины нагрузок даются для цилиндра, ось которого перпендикулярна направлению распространения ударной волны. Однако построение графиков изменения давле-

Рис. VI.81. Схема полуцилиндрического сооружения

ния во времени производилось для полуцилиндра, поскольку цилиндр состоит из двух полуцилиндров, каждый из которых имеет одинаковую нагрузку. Действие ударной волны на сооружение с цилиндрической поверхностью схематически представлено на рис. VI.81. Здесь r — радиус цилиндра, а z — любая точка на его поверхности.

VI.82. Коэффициент отражения в точке z зависит от величины угла α. Зависимость давления отражения от величины угла α для передней части сооружения показана на рис. VI.82а. Здесь p — избыточное давление падающей волны, p_r — отраженное давление у основания (где угол $\alpha = 0$), получаемое из графика, изображенного на рис. III.80; p_{rz} представляет собой величину давления отражения в любой произвольно выбранной точке. Коэффициент торможения также зависит от величины угла α, как это показано на рис. VI.82б, где C_{dz} представляет собой этот коэффициент в произвольной точке z поверхности, т. е. для любых значений угла α в пределах от 0 до 180°.

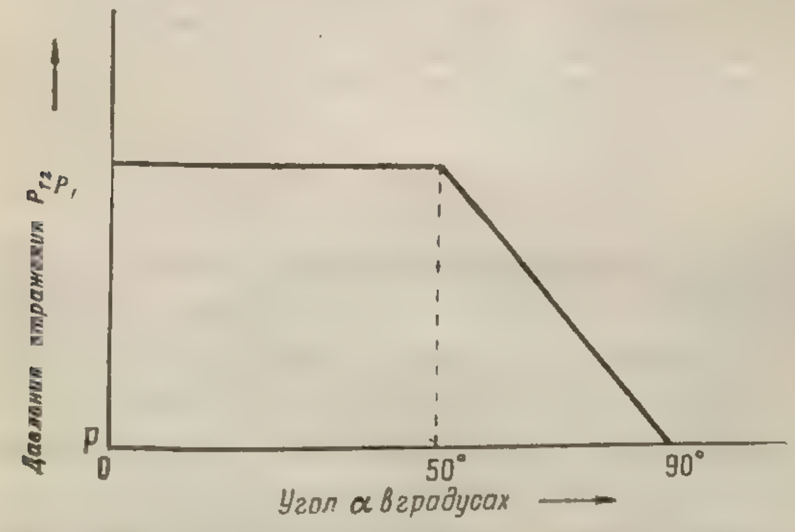


Рис. VI.82а. Зависимость величины давления отражения на поверхности полуцилиндрического сооружения от угла α

VI.83. Используя имеющиеся теперь исходные данные, рассмотрим методы определения: а) нагрузки на переднюю половину, б) нагрузки на заднюю половину и в) результирующей горизонтальной силы.

VI.84. а) **Нагрузка на переднюю половину** (α изменяется от 0 до 90°). Фронт ударной волны достигает основания сооружения в момент времени $t=0$; время достижения фронтом ударной волны любой точки z на передней половине равно $\frac{X}{U}$, где

$$X = r(1-\cos\alpha)$$

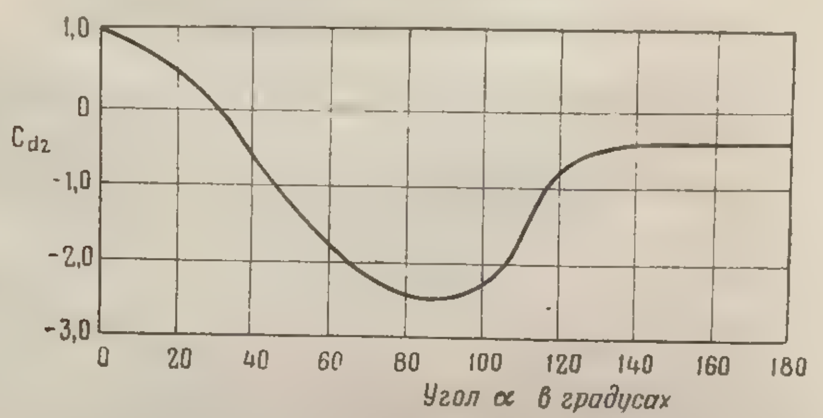


Рис. VI.82б. Зависимость коэффициента торможения на поверхности полуцилиндрического сооружения от угла α

(как это видно из построения на рис. VI.81). Величина давления отражения (по нормали к поверхности в этой точке) получается из графика на рис. VI.82а. Время спада давления t_s равняется $\frac{3r}{U}$ для $\alpha=0°$ и уменьшается линейно до 0 с возрастанием угла α до 90°, как показано на рис. VI.84а. Спустя время t_s давление, направленное по нормали к поверхности, в любой момент времени t может быть найдено из выражения

$$p_t = p\left(t-\frac{X}{U}\right) + C_{dz}\, q\left(t-\frac{X}{U}\right).$$

График изменения давления во времени в любой точке z на передней половине сооружения имеет форму, показанную на рис. VI.84б.

VI.85. б) **Давление на заднюю половину** (α изменяется от 90° до 180°). Время достижения фронтом ударной волны точки z здесь также равняется $\frac{X}{U}$, где $X=r(1-\cos\alpha)$. Но вместо резкого возрастания давления, как это имеет место на передней половине сооружения, здесь время нарастания имеет определенную конечную величину t_r, равную 0 при $\alpha=90°$ и увеличивающуюся линейно до

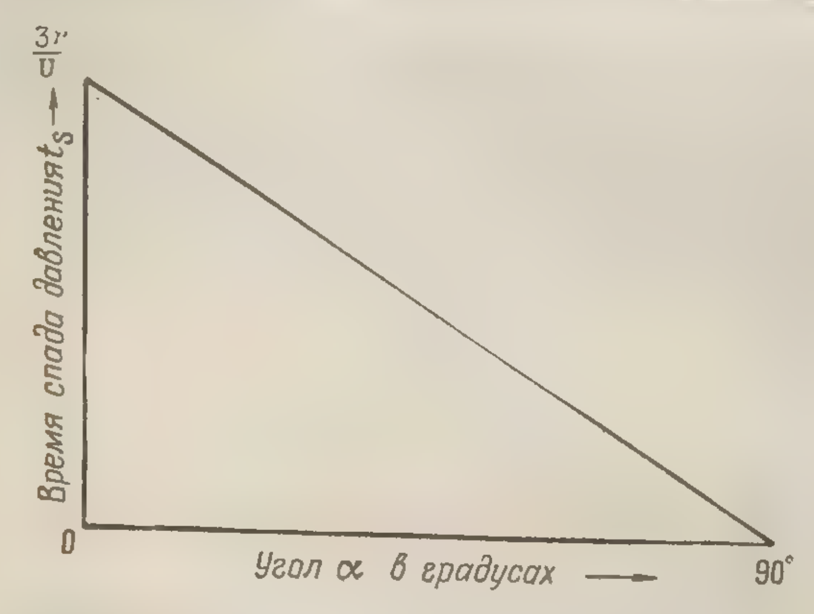


Рис. VI.84а. Зависимость времени спада давления на поверхность полуцилиндрического сооружения от угла α

величины $\frac{2r}{U}$ при возрастании α до 180°, как показано на рис. VI.85а. Следовательно, максимальное давление достигается к моменту времени $\frac{X}{U}+t_r$. Изменение давления во времени можно представить в виде выражения

$$p_t = p\left(t-\right)\frac{X}{U} + C_{dz}\,q\left(t-\frac{X}{U}\right).$$

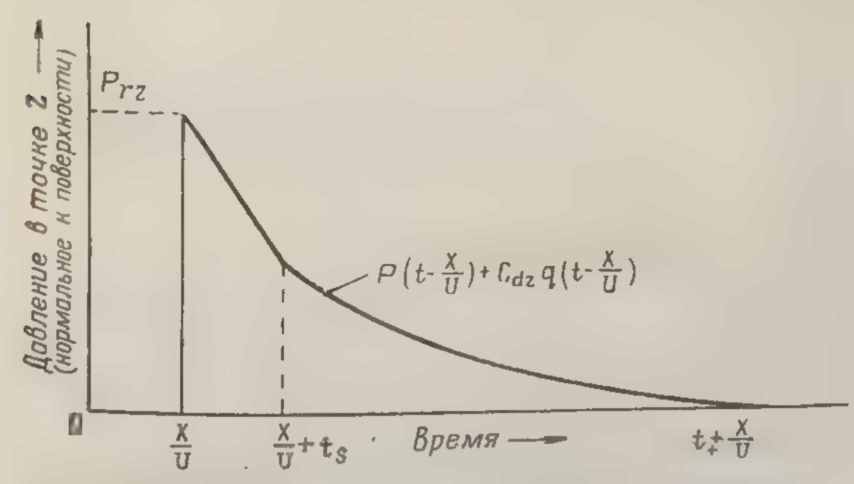


Рис. VI.84б. Изменение давления во времени в точке, находящейся на передней половине полуцилиндрического сооружения

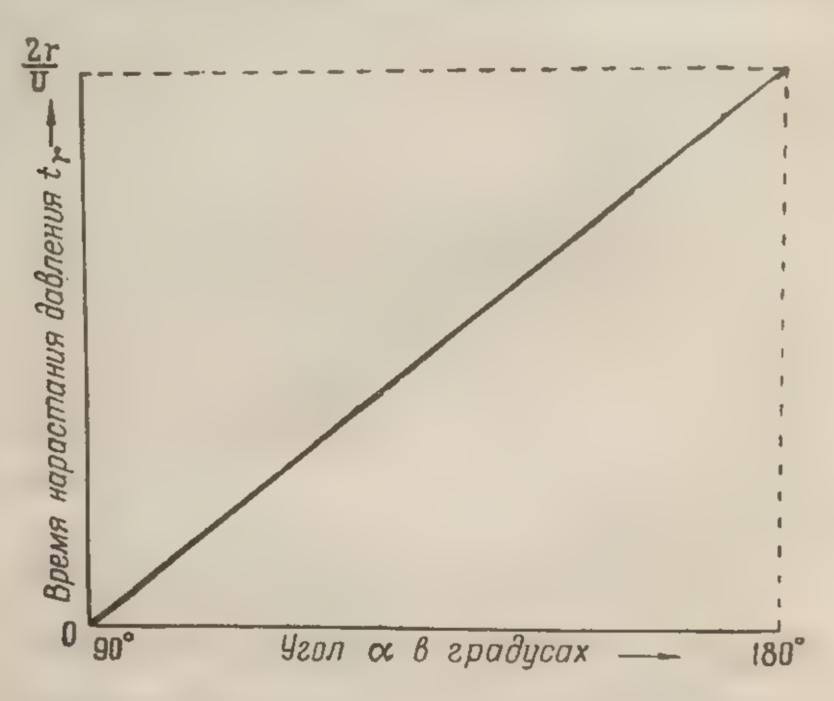


Рис. VI.85а. Зависимость времени нарастания давления на заднюю поверхность полуцилиндрического сооружения от угла α

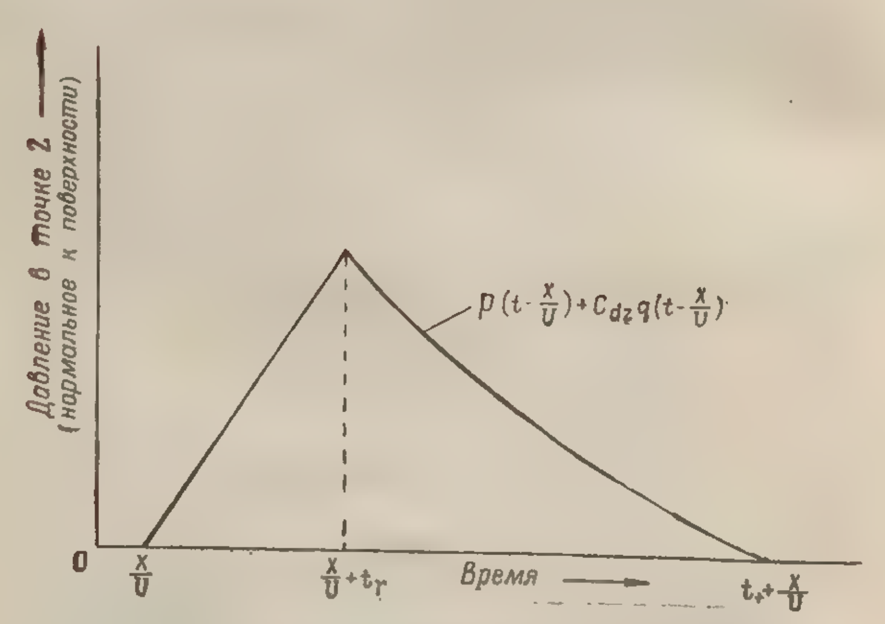


Рис. VI.85б. Изменения давления в точке, находящейся на задней половине полуцилиндрического сооружения, в зависимости от времени

Изменение нагрузки, представленной давлением, направленным нормально к поверхности в какой-либо точке z на задней половине сооружения, показано на рис. VI.85б.

VI.86. в). **Результирующая горизонтальная сила.** Поскольку изложенные выше методы позволяют определить нормально приложенные к поверхности нагрузки в любой произвольно выбранной точке z, результирующая горизонтальная нагрузка не может быть

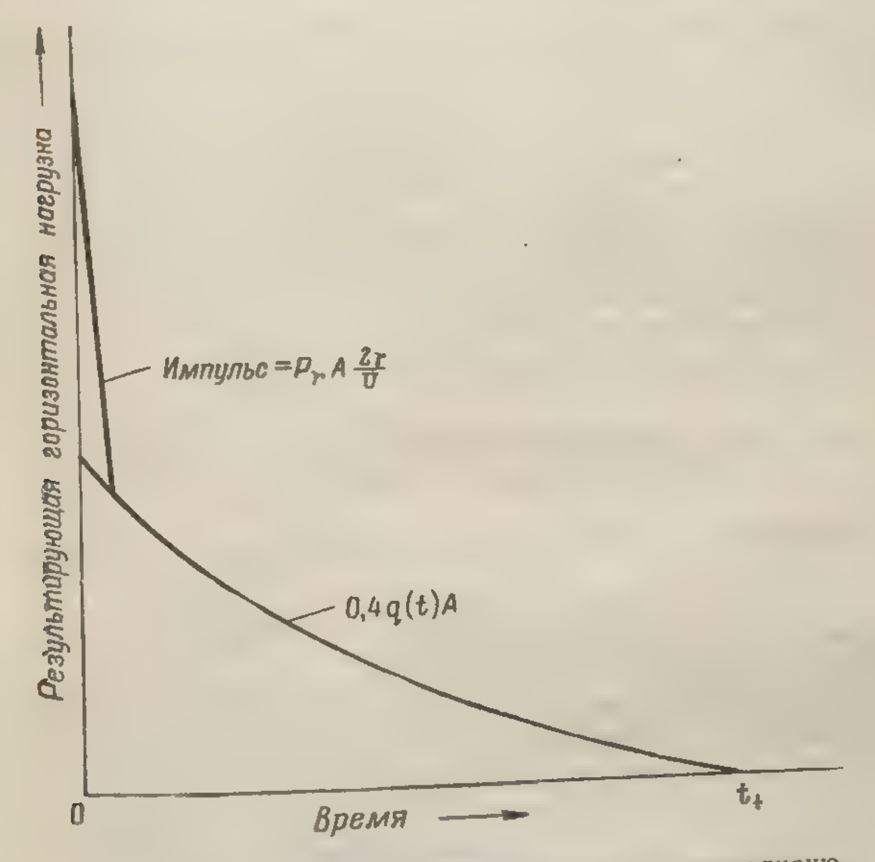


Рис. VI.87. Приближенная кривая зависимости результирующей горизонтальной нагрузки на полуцилиндрическое сооружение от времени

в этом случае найдена как разность нагрузок на переднюю и заднюю стенки сооружения. Чтобы получить результирующую горизонтальную нагрузку, необходимо суммировать горизонтальные составляющие нагрузок отдельно для передней и задней поверхностей сооружения и определить разность этих сумм. На практике при определении величины результирующей нагрузки можно допустить упрощение. При определенных обстоятельствах, особенно для больших сооружений, важным критерием степени повреждения является местная нагрузка, а не результирующая.

VI.87. При приближенном методе определения результирующей нагрузки нагрузка от избыточного давления в процессе обтекания считается эквивалентной начальному импульсу, имеющему величину $\frac{p_r A 2r}{U}$, где A — площадь проекции элемента конструкции на плоскость, перпендикулярную направлению распространения ударной волны. Ниже будет показано, что отношение $\frac{2r}{U}$ представляет собой время, требующееся для того, чтобы ударная волна прошла путь вдоль всей поверхности сооружения. Для рассматриваемой области избыточного давления, которое мы приняли менее 2,1 *кг/см*², коэффициент торможения отдельного цилиндра равен примерно 0,4. Следовательно, к первоначальному импульсу следует добавить оставшуюся часть результирующей горизонтальной нагрузки, величина которой для одиночных сооружений равна $0{,}4q(t)A$ (рис. VI.87). Если решетчатая или каркасная конструкция состоит из элементов с круглым поперечным сечением, то определение нагрузки производится как для открытых каркасных конструкций; C_d принимается равным 0,2 (см. § VI.78).

РЕАКЦИЯ СООРУЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩАЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НИХ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

Повреждение неподвижных и подвижных объектов

VI.88. Действие ударной волны на сооружение вызывает его смещение или деформацию (см. § III.46). При действии ударной волны на сооружения, жестко связанные с основанием, одни части их будут смещаться относительно других. Подвижные объекты могут скользить, перекатываться или опрокидываться. Для неподвижных объектов любое остаточное смещение одной части относительно другой обычно считается повреждением. Примером таких повреждений неподвижных объектов является разрушение окон, крыш и стен зданий.

VI.89. Повреждения подвижных объектов могут иметь тот же характер, но вызываются они не только непосредственным действием давления ударной волны, но и внезапной остановкой объекта, начавшего двигаться под действием ударной волны. Движение объекта само по себе может не вызвать никаких повреждений, но при столкновении с препятствием объект может оказаться серьезно поврежденным. В качестве примера повреждений подвижного объекта можно рассмотреть действие воздушной ударной волны на автомобиль. Ударная волна вызывает непосредственно лишь небольшие наружные повреждения, в то время как скоростной напор может вызвать смещение, сопровождающееся опрокидыванием автомобиля, в результате чего он получит большие повреждения.

Факторы, влияющие на устойчивость объекта

VI.90. Общий анализ факторов, влияющих на устойчивость объекта к нагрузкам от ударной волны, дан в главе III. Здесь будут рассмотрены отдельные характеристики объекта, оказывающие большое влияние на его устойчивость. Этими характеристиками являются: 1) прочность или сопротивляемость деформации, 2) пластичность и 3) масса объекта.

VI.91. **Прочность или сопротивляемость деформации.** Ниже, исходя из соотношения между сопротивляемостью и деформацией, будет дан анализ устойчивости сооружения к действию ударной волны. Соотношение между сопротивляемостью сооружения и величиной деформации получается из соотношения для статического нагружения введением поправок на динамический характер действия сил при ядерном взрыве. Следует отметить, что материалы проявляют максимальную сопротивляемость только по достижении определенной конечной величины деформации (перемещения). Однако сопротивляемость опрокидыванию объекта, находящегося в устойчивом равновесии, имеет максимальное значение в начале опрокидывания и уменьшается с увеличением деформации.

VI.92. **Пластичность.** Пластичность материала, т. е. его способность деформироваться пластически, не разрушаясь, часто выражается через предел упругости, т. е. через величину деформации, выше которой появляются остаточные деформации. Материалы с низкой пластичностью разрушаются при деформациях, лишь немного превышающих предел упругости. С другой стороны, высокая пластичность означает, что деформации могут в 20, 30 или в большее число раз превышать деформации, соответствующие пределу упругости. Так как пластичность является мерой способности материала или сооружения к поглощению энергии, то ее важно учитывать при рассмотрении сопротивляемости сооружения действию ударной волны.

VI.93. **Масса объекта.** Масса объекта определяет инерцию или величину добавочного сопротивления объекта ускорению. Для нагрузок, вызываемых воздушной ударной волной большой силы и малой длительности, масса сооружения является важным параметром при анализе реакции сооружений. Влияние массы обычно выражается величиной периода колебания сооружения. Вообще чем больше масса, тем больше будет инерционное сопротивление и больше период колебания при прочих равных условиях.

Анализ реакции сооружения

VI.94. Если определена нагрузка, действующая на сооружение, то в принципе можно определить и состояние сооружения после действия этой нагрузки, однако во многих случаях такая операция требует сложных математических вычислений. Для облегчения

вычислений необходимо ввести некоторые упрощения. В сооружениях, в которых деформация в одной точке может быть связана с деформацией сооружения в целом, анализ реакции сооружения может быть сведен к сравнительно простой процедуре. Если принять, что перемещение сооружения определяется перемещением одной точки, которая может свободно отклоняться только в одном



Рис. VI.95а. Сооружение как упругая система (масса—пружина) до начала деформации

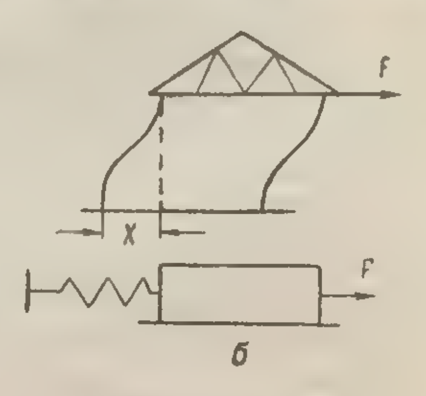


Рис. VI.95б. Сооружение как упругая система (масса — пружина) в процессе деформации

направлении, то сооружение можно заменить системой масса — пружина с одной степенью свободы. Как правило, бо́льшая часть перемещений конструкции определяется влиянием собственных колебаний наинизшей (основной) частоты.

VI.95. Нижеследующий анализ построен на предположении, согласно которому сооружение обладает одной степенью свободы. Таким образом, это сооружение можно рассматривать как систему, состоящую из массы и пружины (рис. VI.95а); при этом колонны сооружения рассматриваются как пружины, на которые опирается масса крыши. В соответствии с допущением о наличии у сооружения лишь одной степени свободы масса системы может отклоняться только в горизонтальном направлении (в направлении X). Таким образом, под действием силы, приложенной к крыше сооружения, масса отклоняется на величину X (рис. VI.95б).

VI.96. Аналогичным образом можно рассматривать и отдельные конструктивные элементы сооружения, заменяя их эквивалентными величинами массы и нагрузки и считая их системами с одной степенью свободы, например обычные или консольные балки (в действительности это будут системы с бесконечным числом степеней свободы). Однако такой метод имеет ограничение, поскольку он не может распространяться непосредственно на все системы со многими степенями свободы, например на многоэтажные здания.

VI.97. Другим ограничением является предположение, что материалы конструкции деформируются за пределами текучести. Это

означает, что с точки зрения расчета сооружения на воздействие ядерного взрыва представляют интерес только большие деформации; соответственно с этим следует пренебречь величиной упругих деформаций и учитывать только пластические деформации.

VI.98. Разработанный метод позволяет определять величину деформаций систем с одной степенью свободы, вызываемых заданной максимальной нагрузкой. Или, наоборот, определять максимальную нагрузку по заданной величине деформаций. При этом должны быть известны: 1) зависимость сопротивляемости сооружения динамическим нагрузкам от величины деформации, 2) основной период колебаний и 3) величина нагрузки от ударной волны.

График зависимости динамического сопротивления от величины деформации

VI.99. На рис. VI.99 показан идеальный график зависимости динамического сопротивления от величины деформации для определенной точки сооружения (обычно точки, имеющей максимальную деформацию под действием сосредоточенной нагрузки, прило-

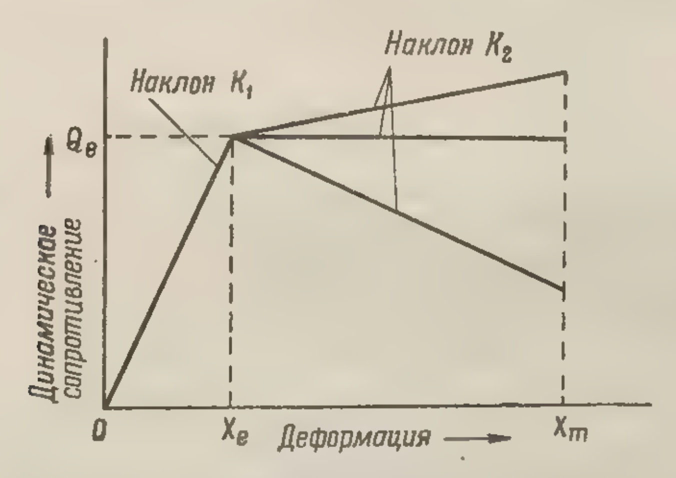


Рис. VI.99. Идеальный график зависимости динамического сопротивления сооружения от величины деформации

женной к данной точке). Если величина деформации превосходит предел текучести X_e, которому соответствует динамическое сопротивление Q_e, то график в зависимости от характера сооружения может иметь одну из трех форм. На рисунке: K_1 обозначает наклон линии графика в зоне упругой деформации, K_2 — наклон линий графика в зоне пластической деформации, X_m — предел прочности.

VI.100. Для железобетонных или стальных сооружений график динамического сопротивления получается из графика статического

сопротивления путем увеличения на 20% величины динамического сопротивления в точках X_e и X_m, соответствующих пределу текучести и максимальной деформации. Для сооружений из камня, дерева и менее прочных металлов графики статического сопротивления используются без поправок. Если график статического сопротивления имеет форму, показанную на рис. VI.100 (сплошной линией), то его можно приближенно представить в виде ломаной прямой линии (показанной пунктиром); при этом площади, заключенные между соответствующими линиями и горизонтальной осью, будут равны между собой.

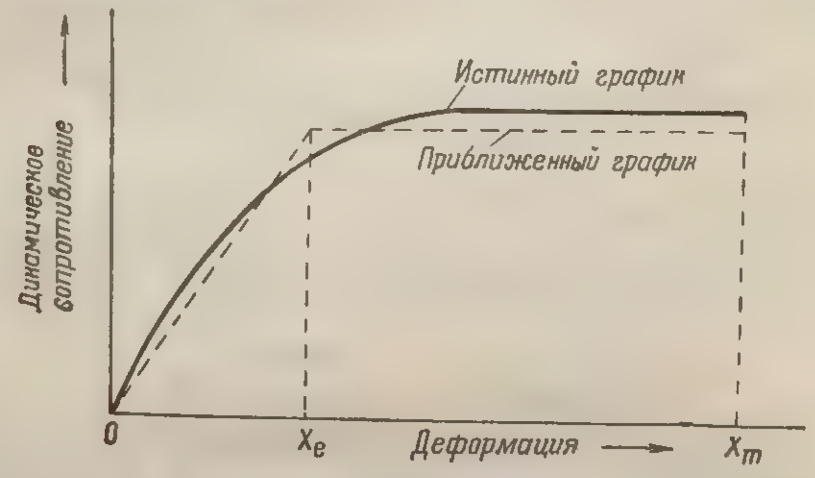


Рис. VI.100. Истинный и приближенный графики зависимости динамического сопротивления сооружения от величины деформации

Основной период колебаний

VI.101. Основной период колебаний T сооружения определяется из формулы

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M_e}{K_1}}, \qquad \text{(VI.101.1)}$$

где K_1 — тангенс угла наклона линии графика в области упругих деформаций и M_e — приведенная масса сооружения.

Для сооружения, рассматриваемого как масса крыши, поддерживаемой колоннами (рис. VI.95), приведенная масса, сосредоточенная над колоннами, может быть принята как действительная масса крыши плюс половина массы колонн. При этом предполагается, что колонны жестко закреплены на обоих концах. Для балок или консолей значение приведенной массы определяется путем умножения общей массы на соответствующий коэффициент, указанный в табл. VI.101.

Таблица VI.101

Коэффициенты приведенной массы и нагрузки

Тип балки и характер нагрузки	Коэффициент массы	Коэффициент нагрузки
Свободно лежащие на опорах балки, равномерно распределенная нагрузка.	Приведенная масса сосредоточена в центре балки (одна степень свободы). —0,50	0,50
Свободно лежащие на опорах балки, сосредоточенная нагрузка приложена в центре.	Приведенная масса сосредоточена в центре балки (одна степень свободы). —0,49	1,00
Балки с закрепленными концами, равномерно распределенная нагрузка.	Приведенная масса сосредоточена в центре балки (одна степень свободы). —0,41	0,50
Балки с закрепленными концами, сосредоточенная нагрузка приложена в центре.	Приведенная масса сосредоточена в центре балки (одна степень свободы). —0,37	1,00
Консольная балка, равномерно распределенная нагрузка.	Приведенная масса сосредоточена на конце балки (одна степень свободы). —0,24	0,40
Консольная балка, сосредоточенная нагрузка приложена на конце балки.	Приведенная масса сосредоточена на конце балки (одна степень свободы). —0,26	1,00

Нагрузка от воздушной ударной волны

VI.102. Для выполнения поставленной перед нами задачи действительный график изменения ударной нагрузки, полученный выше в данной главе, здесь заменен эквивалентным графиком, выражающим изменение силы во времени (рис. VI.102). На графике показаны начальный импульс I и линейная зависимость нагрузки от времени, приложенной в точке сосредоточения массы. На рисунке F — обозначает начальную (или максимальную) силу, а t_1 — длительность действия приведенной распределенной нагрузки. Значение максимальной силы в треугольной диаграмме (рис. VI.102) равно максимальной величине силы в расчетной диаграмме (рис. VI.87), а площадь треугольника должна быть равна площади, ограниченной действительной кривой изменения силы во времени и осями координат. Для обычных балок и консолей значение F определяется путем умножения максимальной величины силы на соответствующий коэффициент, приведенный в табл. VI.101.

VI.103. Величина начального импульса, где это возможно, вычисляется методами, приведенными выше. Во многих случаях, например для больших замкнутых или частично открытых сооружений, влияние начального импульса не учитывается. Для сравнительно малых или открытых сооружений величина начального импульса должна быть определена, хотя во многих случаях она может оказаться незначительной.

VI.104. Распределенные нагрузки от импульса и линейно изменяющейся силы должны быть превращены в сосредоточенные с приложением их в точках, которые принимаются за центры приведенной массы. Для зданий, например, масса сосредоточивается главным образом на уровне междуэтажных перекрытий; при этом половина массы колонн или стен, примыкающих к перекрытию, от-

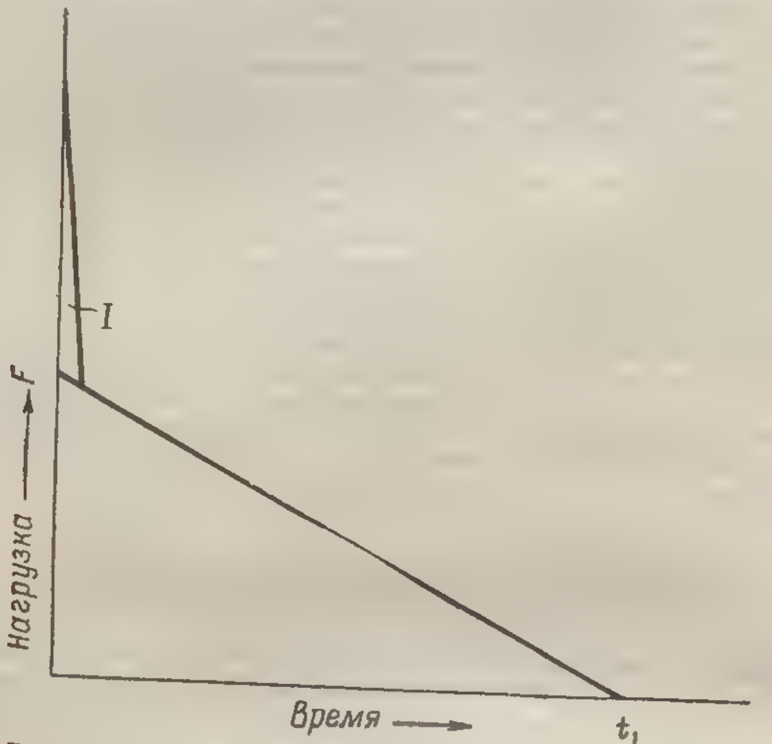


Рис. VI.102. Треугольные диаграммы импульса и зависимости силы от времени

носится к соответствующему уровню. Распределенные нагрузки от ударной волны могут быть сконцентрированы в этих же местах с вычислением сосредоточенных сил обычным способом.

Зависимость между максимальной действующей силой и деформацией

VI.105. Имея необходимые данные, получаемые описанным выше способом, задачу о реакции сооружения можно решить с помощью следующего уравнения

$$\frac{F}{Q_e} = \frac{T}{\pi t_1}(\sqrt{A} - \sqrt{D}) + \frac{A - D}{2\frac{X_m}{X_e}\left(1 + 0{,}7\frac{T}{t_1}\right)}, \qquad \text{(VI.105.1)}$$

где

$$A = 2\frac{X_m}{X_e} - 1 + \frac{K_1}{K_2}\left(\frac{X_m}{X_e} - 1\right)^2$$

и $D=\left(\frac{2\pi I}{Q_e T}\right)^2$, или $D=0$, если I отсутствует,

где F — максимальная сила в *кг* (см. рис. VI.102);
t_1 — длительность действия эквивалентной линейно изменяющейся нагрузки в секундах (см. рис. VI.102);
Q_e — сопротивление в *кг*, соответствующее пределу текучести (см. рис. VI.99);
T — основной период колебания в секундах (см. выражение VI.101.1);
I — начальный импульс в *кг·сек* (см. рис. VI.79, VI.87 и VI.102);
X_e — деформация, соответствующая пределу текучести в любых единицах (см. рис. VI.99);
X_m — максимальная или заданная деформация в тех же единицах, в каких дается величина X_e (см. рис. VI.99);
K_1 — тангенс угла наклона линии графика изменения динамического сопротивления в зависимости от деформации в области упругих деформаций (см. рис. VI.99);
K_2 — тангенс угла наклона линии графика изменения динамического сопротивления в зоне пластической деформации (см. рис. VI.99).

VI.106. При помощи выражения (VI.105.1) можно решать задачи двух типов. Если задана нагрузка, т. е. указано расстояние от центра взрыва заданной мощности и, следовательно, сила F становится известной величиной, то можно определить соответствующую деформацию X_m; и, наоборот, если задана максимальная величина деформации X_m, то может быть вычислена соответствующая ей величина силы F. И в том и в другом случае решение может быть получено методом последовательных приближений.

VI.107. Если нагрузка задана так, что сила F и время t_1 могут быть определены, то прежде всего необходимо задаться некоторым значением величины X_m, которое затем должно быть проверено при помощи выражения (VI.105.1).

Новое значение X_m снова проверяется и так повторяется несколько раз, до тех пор, пока не будет достигнуто равенство обеих частей уравнения. С другой стороны, если принимается, что определенная величина деформации X_m соответствует допустимой степени повреждения или той, которую не следует превосходить, то вычисление силы F будет несколько более трудным, так как величина t_1 является также неизвестной и зависящей от величины силы F. Поэтому для определения значения t_1 необходимо задаться линейной зависимостью силы F от времени t.

При таком допущении из уравнения (VI.105.1) определяется приблизительная величина силы F, а затем производится проверка предположенной линейной функции. Это позволяет получить но-

вое, более близкое к истине значение величины t_1. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено достаточно удовлетворительное решение.

VI.108. Применение только что описанного метода может привести к ошибке, когда кривая изменения динамического давления показывает, что сооружение является неустойчивым, то есть когда величина K_2 является отрицательной. В этом случае решение задачи по определению величины силы F, которая создает деформацию X_m, может привести к выводу, что для получения меньших величин X_m необходимы большие нагрузки. Для случаев, когда значение K_2 отрицательно, сила F первоначально находится для определенной величины деформации X_m, например равной 0,7 *м*, затем сила F определяется вновь для некоторой меньшей величины деформации, например равной 0,6 *м*, которая больше, чем деформация X_e, но близка к первоначальной величине X_m. Если второе значение силы F больше, чем первое, то вычисление следует продолжить, чтобы определить максимальную величину силы F, обозначаемую символом F_m, которая соответствует величине деформации X_m. Для всякой большей величины деформации X_m необходимо определить соответствующую величину силы F_m.

ГЛАВА VII

СВЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ДЕЙСТВИЕ

ИЗЛУЧЕНИЕ ОГНЕННОГО ШАРА

Общие свойства светового излучения

VII.1. Как уже отмечалось в главе I, одно из важнейших отличий ядерной бомбы от обычной (тротиловой) заключается в том, что при взрыве ядерной бомбы значительная часть энергии высвобождается в форме светового (или теплового) излучения. В связи с тем, что при ядерном взрыве на единицу массы бомбы высвобождается огромное количество энергии, температура в области взрыва достигает нескольких миллионов градусов, тогда как при взрыве обычных бомб температура достигает лишь нескольких тысяч градусов. Вследствие того, что огненный шар имеет очень высокую температуру, приближающуюся к температуре в центре Солнца, значительная часть энергии, освобождающейся при ядерном взрыве, выделяется в форме светового излучения.

VII.2. Огненный шар, образующийся при ядерном взрыве, по составу светового излучения во многих отношениях напоминает Солнце. В обоих случаях испускаются ультрафиолетовые лучи с короткими длинами волн, видимые лучи, имеющие более длинные волны, и инфракрасные лучи, длина волн которых еще больше. Световое излучение распространяется со скоростью видимого света, то есть со скоростью 300 тыс. *км/сек*, вследствие чего время, необходимое для прохождения светового излучения от огненного шара до объекта, находящегося на расстоянии нескольких километров от места взрыва, является ничтожным.

VII.3. Световое излучение, испускаемое огненным шаром (так же, как и солнечные лучи), по мере его прохождения через воздух ослабляется. Количество энергии светового излучения, которое при данном ядерном взрыве достигает рассматриваемой точки, зависит от расстояния от этой точки до места взрыва и состояния окружающей атмосферы. Точно так же, как и при распространении солнечного света, бóльшая часть ультрафиолетовых

лучей, испускаемых при ядерном взрыве, поглощается в воздухе; вследствие этого световые лучи, достигающие объектов, находящихся на интересующих нас расстояниях от места ядерного взрыва, обладают преимущественно длинными волнами, то есть эти лучи относятся к видимому и инфракрасному участкам спектра.

VII.4. Одна треть общего количества энергии, освобождающейся при ядерном взрыве, выделяется в форме светового излучения. Это значит, что на каждую тысячу тонн тротилового эквивалента ядерного взрыва в виде светового излучения освобождается энергия, равная примерно $3{,}3 \times 10^{11}$ *кал* (что эквивалентно почти 400 000 *квт-ч*); эта энергия выделяется в течение нескольких секунд (или за меньшее время) после взрыва [1]. Освобождение такого громадного количества световой энергии в течение короткого промежутка времени имеет важные последствия.

VII.5. Хотя при воздушном ядерном взрыве большую часть разрушений вызывает ударная волна, однако и световое излучение способствует увеличению общих повреждений путем воспламенения горючих материалов, таких, как бумага, сухие листья и сучья, создавая таким образом пожары в зданиях, лесах и т. п. Эти пожары могут быстро распространяться среди развалин, образовавшихся в результате действия воздушной ударной волны. Кроме того, световое излучение может вызвать ожоги кожи у людей, находящихся на открытом месте на таких расстояниях от ядерного взрыва, на которых действие воздушной ударной волны или начальной ядерной радиации незначительно. Разница между радиусами поражающего действия светового излучения и действия других упомянутых факторов становится более заметной по мере увеличения общего количества энергии, освобождающейся при взрыве. Поражения, вызванные остаточными ядерными излучениями, которые испускаются радиоактивными выпадениями, сопровождающими наземный (надводный) ядерный взрыв, могут наблюдаться на расстояниях, превышающих радиус поражающего действия светового излучения; однако даже и в этом случае световое излучение будет представлять собой серьезный фактор поражения людей.

Ослабление светового излучения

VII.6. Масштабы поражений людей, вызываемых световым излучением, а также возможность воспламенения горючих материалов в сильной степени зависят от количества энергии светового излучения, попадающей на единицу площади кожи, ткани или другого облучаемого материала. Световая энергия, падающая на

[1] Энергия светового излучения, приходящаяся на каждую тысячу тонн тротилового эквивалента ядерного взрыва, может превратить в пар около полумиллиона килограммов воды при обычной температуре.

данную поверхность при взрыве, будет тем меньше, чем дальше эта поверхность находится от места взрыва. Это объясняется двумя причинами: 1) распределением светового излучения по все большей площади по мере того, как это излучение распространяется от огненного шара, и 2) ослаблением излучения при его прохождении через воздух. Рассмотрим влияние этих двух причин.

VII.7. Если излучение равномерно распространяется во всех направлениях, то на расстоянии D от центра взрыва на каждую единицу площади поверхности сферы радиуса D будет падать одинаковое количество световой энергии. Общая площадь этой сферы составит $4\pi D^2$. Если общее количество энергии светового излучения, образующейся при взрыве, обозначить через E, то количество энергии, приходящейся на единицу площади на расстоянии D от места взрыва при отсутствии ослабления излучения атмосферой, составит $E/4\pi D^2$. Очевидно, что эта величина изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от центра взрыва. Например, на расстоянии 3,2 *км* от центра взрыва количество световой энергии, приходящейся на единицу площади, составит $^1/_4$ того количества энергии, которое будет получено на расстоянии вдвое меньшем, то есть на расстоянии в 1,6 *км*.

VII.8. Чтобы определить количество энергии светового излучения, фактически падающей на единицу площади, необходимо учесть степень ослабления излучения атмосферой. Это ослабление обусловливается двумя основными причинами, а именно: поглощением и рассеянием. Атомы и молекулы, находящиеся в воздухе, могут поглощать некоторую долю излучения и таким образом ослаблять его. Особенно эффективно поглощаются лучи с короткой длиной волны (ультрафиолетовые). В процессе поглощения светового излучения важную роль играют молекулы кислорода и озона. Хотя количество озона, содержащегося в воздухе, обычно очень невелико, значительное количество его образуется в результате взаимодействия гамма-лучей, испускаемых при ядерном взрыве, с молекулами атмосферного кислорода.

VII.9. В результате поглощения светового излучения ультрафиолетовая часть спектра этого излучения заметно уменьшается даже на небольших расстояниях от центра взрыва. На таких расстояниях, на которых поражающее действие светового излучения имеет бо́льшее значение по сравнению с другими поражающими факторами (ударной волной и начальной ядерной радиацией), количество ультрафиолетовых лучей является совершенно незначительным.

VII.10. Ослабление светового излучения, обусловленное рассеянием, т. е. протекающее в результате отклонения лучей от их первоначального направления, происходит при любом составе спектра. Рассеяние может быть вызвано молекулами, например, кислорода и азота, находящимися в воздухе. Однако наибольшее значение имеет рассеяние, вызванное отражением и дифракцией световых

лучей частицами пыли, дыма или тумана, содержащимися в атмосфере. Отклонение лучей от их первоначального пути, обусловленное рассеянием, приводит к тому, что распространение светового излучения в большей мере носит диффузионный характер, чем прямолинейный.

Влияние атмосферных условий

VII.11. Ослабление энергии светового излучения, вызванное его рассеянием в воздухе, зависит от атмосферных условий, главными из которых являются концентрация и размеры частиц, находящихся в воздухе, а также от длины волны излучения. Это значит, что излучения, обладающие различной длиной волны, а именно: ультрафиолетовые, видимые и инфракрасные, будут ослабляться по-разному. Для практических целей в большинстве случаев можно принять, что общее ослабление является средней величиной для всех длин волн, входящих в состав светового излучения. При этом необходимо иметь в виду, что результаты, получаемые при таком допущении, будут менее точными.

VII.12. Способность атмосферы рассеивать световое излучение характеризуется дальностью видимости или просто видимостью. Дальность видимости определяется расстоянием по горизонтали, на котором большой темный предмет можно видеть над горизонтом в дневное время. Приблизительный характер зависимости между дальностью видимости и прозрачностью атмосферы приводится в табл. VII.12.

Таблица VII.12

Дальность видимости и прозрачность атмосферы

Атмосферные условия	Дальность видимости, *км*
Исключительно прозрачный воздух	Более 48
Очень прозрачный	19—48
Умеренно прозрачный	9—19
Легкая дымка	4—9
Дымка	2—4
Плотная дымка или туман	Менее 2

VII.13. Согласно существовавшему ранее мнению количество энергии светового излучения, приходящейся на единицу площади облучаемого материала, расположенного на определенном расстоянии от ядерного взрыва, очень сильно зависит от прозрачности атмосферы. Однако оказывается, что при изменении дальности видимости в весьма широких пределах влияние состояния атмосферы оказывается незначительным. В настоящее время считают, что по мере увеличения расстояния от центра взрыва действительно имеет

место ослабление светового излучения; однако это ослабление происходит не так быстро, как предполагали раньше. Далее, установлено также, что на любом расстоянии от места взрыва, не превышающем половины дальности видимости, степень ослабления светового излучения при изменении дальности видимости в пределах от 3 до 80 *км* (соответственно: легкая дымка и исключительно прозрачный воздух) изменяется не очень сильно.

VII.14. Причина такого, на первый взгляд странного явления состоит в том, что световое излучение, достигающее данной точки, расположенной на определенном расстоянии от ядерного взрыва, включает в себя как прямое, так и рассеянное излучение; если воздух чист и в нем содержится очень небольшое количество взвешенных частиц, то количество рассеянного излучения, которое доходит до данной точки, является небольшим; в этой точке излучение представлено в основном только лучами, которые распространяются прямолинейно от взорвавшейся бомбы, не подвергаясь рассеянию.

VII.15. Если воздух содержит некоторое количество взвешенных частиц, то интенсивность прямых лучей будет меньше, чем в случае распространения излучений в чистой атмосфере. Однако это уменьшение в значительной степени компенсируется увеличением количества рассеянного излучения, попадающего в рассматриваемую точку. Многократное рассеяние, т. е. рассеяние уже рассеянного излучения, вероятность которого весьма значительна, если концентрация частиц в воздухе большая, приводит к возвращению части излучения в его первоначальное направление.

VII.16. Вследствие компенсации, являющейся результатом многократного рассеяния, общее количество световой энергии ядерного взрыва, падающее на данном расстоянии на единицу площади, в определенных пределах изменения дальности видимости изменяется незначительно. Следует отметить, что этот общий вывод остается справедливым только в том случае, когда атмосфера достаточно прозрачна, т. е. при отсутствии атмосферных осадков, тумана или плотной дымки, наблюдающейся обычно в промышленных городах. При наличии этих особых условий большая часть светового излучения подвергается рассеянию. В этом случае значительная потеря прямого излучения не может быть компенсирована многократным рассеянием. В результате происходит уменьшение количества лучистой энергии, получаемой на данном расстоянии от места взрыва. Другой особый случай, который рассматривается ниже, имеет место тогда, когда взрыв происходит выше слоя облаков.

VII.17. Следует также обратить внимание на то, что ослабление светового излучения зависит от атмосферных условий в небольшой степени только в том случае, когда расстояние от места взрыва меньше половины дальности видимости. На расстояниях от места взрыва, превышающих половину дальности видимости,

потеря световой энергии будет тем больше, чем меньше дальность видимости. Поэтому предположение о том, что на больших расстояниях от места взрыва ослабление энергии светового излучения не зависит от дальности видимости, приводит при расчете количества падающей световой энергии к завышенным результатам. Но с точки зрения защиты от светового излучения завышенные результаты предпочтительнее заниженных.

Влияние дыма и тумана

VII.18. В том случае, когда воздушный взрыв происходит выше слоя плотных облаков, дыма или тумана, значительная часть светового излучения отражается от поверхности этого слоя вверх. Это отраженное излучение можно считать потерянным, поскольку речь идет о воздействии светового излучения на какой-либо объект, расположенный на поверхности земли. Кроме того, большая часть излучения, проходящего сквозь слой, будет рассеиваться и поглощаться, и таким образом только незначительная его доля будет доходить до данной точки, находящейся на поверхности земли, прямым путем. Эти два фактора приводят к значительному уменьшению количества световой энергии, достигающей данного объекта, расположенного на поверхности земли и прикрытого слоем тумана или дыма.

VII.19. Искусственное (химическое) задымление ослабляет световое излучение так же, как туман. Плотная дымовая завеса, образованная между центром ядерного взрыва и объектом, может уменьшить количество энергии светового излучения в 10 раз по сравнению с тем количеством, которое было бы получено, если бы не было дымовой завесы. Таким образом, дымовые завесы, по-видимому, могут обеспечить защиту от светового излучения, испускаемого при ядерном взрыве.

VII.20. Важно понять, что ослабление светового излучения слоем тумана или дымовой завесой будет происходить только в том случае, когда центр ядерного взрыва будет находиться выше или (по крайней мере) в самом слое тумана (или дыма). Если взрыв произойдет в умеренно прозрачном воздухе ниже слоя облаков или тумана, то та часть излучения, которая в нормальных условиях ушла бы вверх, будет отражена обратно на землю. В результате такого отражения количество световой энергии, полученное в данной точке, фактически будет больше, чем при таких же атмосферных условиях, но без облаков или тумана.

Действие защитного экранирования

VII.21. Световое излучение, испускаемое при ядерном взрыве, если только оно не подвергается рассеянию, подобно обычному свету распространяется прямолинейно от своего источника — ог-

ненного шара. Поэтому любой твердый непрозрачный предмет, например стена или дерево, находящийся между данным объектом и огненным шаром, будет защищать от действия светового излучения. Некоторые примеры, характеризующие эффективность такой защиты (многие из которых имели место при ядерных взрывах в Японии), будут рассмотрены ниже. С другой стороны, прозрачные материалы, такие, как стекло или пластмассы, пропускают световое излучение, ослабляя его лишь в незначительной степени.

VII.22. Защитный экран, который находится только между данным объектом и огненным шаром, но не окружает объекта, не может быть полностью эффективным при наличии в атмосфере дымки. Значительная часть светового излучения, особенно при его распространении на большие расстояния от места взрыва, подвергается рассеянию и будет поступать в данную точку со всех направлений, а не только прямолинейно от точки взрыва. Это обстоятельство нужно иметь в виду при рассмотрении проблемы защиты от действия светового излучения.

Влияние вида взрыва

VII.23. Все вышесказанное относилось к световому излучению, испускаемому при воздушном ядерном взрыве. Для взрывов других видов общие результаты воздействия светового излучения являются такими же, хотя степень этого воздействия будет различной. При наземном (надводном) взрыве, вследствие того что огненный шар касается поверхности земли (или воды), доля общего количества энергии взрыва, которая испускается в виде светового излучения, будет меньше, чем при воздушном взрыве. Это обусловлено отчасти тем, что при наземном взрыве большая часть светового излучения поглощается поверхностью земли (или воды). По мере увеличения высоты взрыва потеря светового излучения в результате такого поглощения уменьшается.

VII.24. Другой важный фактор заключается в том, что в случае наземного (надводного) взрыва большая часть светового излучения, падающая на данный объект, расположенный на поверхности земли, проходит через слой атмосферного воздуха, находящегося вблизи этой поверхности. В этом приземном слое атмосферы происходит значительное поглощение светового излучения молекулами паров воды и углекислого газа, а также (более сильное, чем на больших высотах) рассеяние излучения частицами пыли. Следовательно, при наземном (надводном) взрыве не только меньшая доля всей энергии взрыва испускается в виде световой энергии, но и меньшая часть этой световой энергии доходит до цели, находящейся на определенном расстоянии от точки взрыва. Таким образом, воздействие светового излучения при наземном взрыве будет значительно меньше, чем при воздушном; при этом имеется в виду, что в обоих случаях мощность взрыва одинакова.

VII.25. При подземных или подводных взрывах, в тех случаях, когда через поверхность земли (воды) прорывается лишь небольшая часть огненного шара, почти все световое излучение поглощается грунтом или водой. Энергия светового (теплового) излучения расходуется в этом случае на испарение почвы или воды. В связи с этим при подземном (подводном) ядерном взрыве поражающее действие светового излучения не проявляется в такой степени, как при воздушном взрыве, и может отсутствовать.

ДЕЙСТВИЕ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поглощение светового излучения

VII. 26. Выше отмечалось, что температура огненного шара, образующегося при ядерном взрыве, и температура Солнца примерно одинаковы. Ввиду этого огненный шар ядерного взрыва в отношении испускания световой энергии напоминает собой Солнце. При этом необходимо отметить, что взрыв ядерной бомбы отличается от взрыва обычной фугасной бомбы не только общим количеством освобождающейся энергии, но также и тем, что температура, достигаемая при ядерном взрыве, значительно превосходит температуру, наблюдающуюся при взрыве обычного фугасного взрывчатого вещества. Это приводит к тому, что доля энергии, испускаемая в виде светового излучения, при взрыве обычной бомбы гораздо меньше, чем при взрыве ядерной бомбы. По указанной причине поражающее действие светового излучения при взрыве обычной бомбы ничтожно, если не считать, может быть, очень небольших расстояний от точки взрыва. И, наоборот, количество световой энергии, достигшее поверхности земли, например при воздушном ядерном взрыве, может быть значительным даже на больших расстояниях от места взрыва. Из этого следует, что при ядерных взрывах поражающее действие светового излучения несравненно больше, чем при взрывах обычных тротиловых бомб. Другими словами, широкие масштабы поражающего действия светового излучения представляют собой новую специфическую особенность, присущую только ядерному взрыву.

VII. 27. Количество световой энергии, падающей на единицу площади, зависит от общего количества энергии, освобождающейся при ядерном взрыве, расстояния от центра взрыва и в некоторой степени от состояния атмосферы. Хотя световое излучение, испускаемое огненным шаром, охватывает широкий диапазон длин волн — от коротких ультрафиолетовых до инфракрасных,— большая часть ультрафиолетового излучения поглощается или рассеивается по мере его прохождения через атмосферу на сравнительно небольших расстояниях от места взрыва.

VII.28. В первом из двух импульсов светового излучения, о которых говорилось в главе II, вследствие очень высокой темпера-

туры огненный шар испускает в основном ультрафиолетовые лучи[1]. Однако первый импульс даже при ядерном взрыве с тротиловым эквивалентом в несколько млн. *т* продолжается лишь в течение незначительной доли секунды; поэтому количество световой энергии, испускаемое за это время, составляет ничтожно малую часть общего количества световой энергии, образующейся при взрыве. На таких расстояниях от места взрыва, на которых световое излучение проявляет еще свое поражающее действие, доля ультрафиолетового излучения является незначительной, во-первых, из-за очень небольшой продолжительности периода, в течение которого поверхность огненного шара имеет очень высокую температуру, и, во-вторых, вследствие сильного поглощения ультрафиолетовых лучей атмосферой. Тем не менее, поскольку ультрафиолетовые излучения обладают большей способностью наносить биологические поражения, чем видимые, или инфракрасные лучи, они могут в некоторых случаях усиливать поражение, вызываемое световым излучением.

VII.29. Когда световое излучение падает на какой-либо материал или предмет, часть этого излучения может отразиться, некоторая часть будет поглощена, а остальная часть может пройти через материал и в конечном счете будет воздействовать на другие объекты. Именно та часть излучения, которая поглощается тем или иным материалом, превращается в тепло и тем самым определяет степень поражающего действия светового излучения на данный материал. Величина, или доля излучения, поглощаемого данным материалом, зависит в основном от характера и цвета этого материала. Материалы, обладающие высокой прозрачностью и отражательной способностью, световое излучение поглощают мало и поэтому относительно хорошо выдерживают его действие. Тонкий слой материала часто пропускает большую часть падающего на него излучения, и поэтому сам не получает серьезных повреждений.

VII.30. Ткань черного цвета поглощает гораздо большую часть падающего на нее светового излучения, чем ткань светлого цвета. Поэтому темная ткань будет подвергаться значительно большему воздействию светового излучения, чем светлая.

Кроме того, материал, окрашенный в светлый цвет, будет обугливаться значительно меньше, чем такой же материал, окрашенный в темный цвет. Однако материал, который во время начальных стадий действия светового излучения легко темнеет

[1] Из теоретических исследований и экспериментальных измерений известно, что длина волны, соответствующая максимальной плотности энергии излучения идеального излучателя (или «абсолютно черного тела»), на который весьма похож огненный шар, уменьшается с увеличением температуры излучения. При температурах выше 7600° К этот максимум находится в ультрафиолетовой области спектра (см. § VII.106).

(обугливается), ведет себя в основном, как черный, т. е. как сильный поглотитель световой энергии, независимо от его первоначального цвета. С другой стороны, если в начальной стадии действия излучения образуется дым, то он частично защищает материал от дальнейшего воздействия на него светового излучения.

VII.31. Почти все световое излучение, поглощенное материалом, немедленно превращается в тепло. Это приводит к тому, что температура поглощающего материала быстро повышается. Именно высокая температура может причинить ожог или повреждение или даже воспламенить возгораемые материалы. При рассмотрении поражающего действия светового излучения ядерного взрыва важно иметь в виду не только то, что общее количество энергии светового излучения является значительным, но также и то, что это количество энергии испускается в течение очень короткого промежутка времени. Это означает, что интенсивность светового излучения [1], т. е. скорость, с которой это излучение падает на ту или иную поверхность, является очень большой. Вследствие высокой интенсивности излучения количество тепла, которое образуется при поглощении светового излучения, возрастает с большой скоростью.

VII.32. Поскольку в течение того короткого промежутка времени, за который излучение, испускаемое во время ядерного взрыва, падает на материал, лишь небольшая часть тепла отводится за счет теплопроводности, поглощение световой энергии происходит в основном только на небольшой глубине материала (за исключением, может быть, хороших проводников тепла, таких, как металлы). В результате этого температура на поверхности материала достигает очень высоких значений. Например, подсчитано, что при ядерных взрывах в Японии, которые были произведены на высоте около 560 *м*, температура на поверхности земли непосредственно под центром взрыва составляла, вероятно, 3000—4000° С. Правда, с увеличением расстояния от центра взрыва температура очень быстро уменьшалась, однако имеются данные, свидетельствующие о том, что даже на расстоянии 1200 *м* она превышала 1600° С (см. § VII.83).

VII.33. Самым важным физическим результатом действия высоких температур, развивающихся вследствие быстрого поглощения светового излучения, являются ожоги кожи, оплавление, обугливание и, возможно, воспламенение возгораемых органических веществ, например древесины, тканей или бумаги (рис. VII.33). Тонкие или пористые материалы, такие, как легкие ткани, газетная бумага, сухая трава и листья, а также сухие деревья, могут воспламеняться под действием светового излучения.

[1] Интенсивность светового излучения определяется количеством световой энергии, приходящимся на единицу площади в единицу времени. (*Прим. перев.*)

С другой стороны, органические материалы большой толщины, например ветки толщиной более 1 *см*, пластмассы и тяжелые ткани, обугливаются, но не горят. В этом случае может появиться плотный дым или даже языки пламени, однако устойчивого горения материала не будет.



Рис. VII.33. Воспламенение обивочного материала в легковом автомобиле под действием светового излучения ядерного взрыва привело к распространению огня на другие части автомобиля (полигон в штате Невада)

VII.34. Некоторой иллюстрацией поведения материалов при действии на них светового излучения могут служить фотоснимки (рис. VII.34) одного из домов с деревянным каркасом, который подвергся воздействию испытательного ядерного взрыва, произведенного в штате Невада в 1953 г. Как упоминалось выше (см. § IV.12), для того чтобы стены отражали возможно бóльшую часть светового излучения и чтобы свести к минимуму возможность возникновения пожара, дома перед их испытаниями были покрашены снаружи белой краской. В момент взрыва та часть дома, которая была обращена к месту взрыва, покрылась густым черным дымом (рис. VII.34а). Однако каких-либо признаков пламени



Рис. VII.34а. Воздействие светового излучения на деревянный дом. Пожар возник почти мгновенно после ядерного взрыва (количество энергии светового излучения составляло 25 *кал/см²*)



Рис. VII.34б. Результат воздействия светового излучения на деревянный дом (спустя 2 секунды после ядерного взрыва)

не было. Через очень короткое время, но до момента прибытия ударной волны, т. е. менее чем через 2 секунды после взрыва, дымообразование прекратилось (рис. VII.34б). Видимо, в связи с тем, что в течение короткого периода воздействия светового излучения тепло было частично отведено от поверхности материала, его температура оказалась недостаточно высокой для того, чтобы дерево воспламенилось. Как будет показано ниже (§ VII.65), значительно более тонкие слои горючего материала на таком же расстоянии от центра взрыва будут, по-видимому, воспламеняться.

VII.35. Воспламенение материалов под действием светового излучения зависит от ряда факторов, из которых, помимо характера самого материала, наиболее важными являются его толщина и содержание влаги. Например, тонкий слой данного материала воспламенится скорее, чем толстый; образец из сухого материала будет поврежден скорее, чем из сырого. Температура материала также может иметь важное значение, поскольку нагретый материал будет воспламеняться легче, чем холодный.

VII.36. Скорость испускания энергии светового излучения огненным шаром является важным фактором, определяющим степень обугливания и воспламенения различных материалов, а также тяжесть ожогов кожи у людей, подвергшихся воздействию светового излучения. При данном общем количестве световой энергии, поглощенной единицей площади материала, повреждение будет тем больше, чем быстрее выделяется энергия. Таким образом, чтобы получить в данном материале один и тот же тепловой эффект для двух различных по мощности взрывов, общее количество световой энергии, полученное материалом на единицу площади, для взрыва большей мощности должно быть больше, чем для взрыва меньшей мощности. Это вытекает из того, что при более мощном взрыве световая энергия выделяется в течение относительно большего периода времени, т. е. медленнее, чем при менее мощном ядерном взрыве.

ОЖОГИ КОЖИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ДЕЙСТВИЕМ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Классификация ожогов

VII.37. Световое излучение ядерного взрыва может вызвать ожоги кожи непосредственно, т. е. в результате поглощения лучистой энергии, испускаемой огненным шаром, или косвенно, т. е. в результате воздействия на людей пожаров, возникших от действия светового излучения. Ожоги первого типа часто называют **световыми ожогами**, так как они создаются поражающим действием излучения, испускаемого огненным шаром в течение очень короткого промежутка времени. Косвенные (или вторичные)

ожоги называют также ожогами пламенем; они ничем не отличаются от обычных ожогов кожи, которые могут иметь место при больших пожарах, независимо от причины их возникновения.

VII.38. Важная особенность ядерного взрыва состоит в том, что воздействие на людей светового излучения, испускаемого при таком взрыве, может вызвать очень большое количество световых ожогов (см. § VII.69). Физическая и физиологическая природа световых ожогов, возникающих вследствие очень быстрого нагревания кожи, несколько отличается от природы обычных ожогов, возникающих под действием пламени. Однако оба эти типа ожогов с точки зрения их общего воздействия на организм и способов лечения являются одинаковыми. В этом отношении они не отличаются от ожогов, возникающих по другим причинам, например при соприкосновении с горячим металлом.

VII.39. Ожоги кожи, независимо от причины их возникновения, классифицируются по степени (или глубине) поражения. Ожоги первой степени, примером которых могут служить ожоги, полученные в результате неумеренного загорания на солнце, вызывают покраснение кожи. Ожоги первой степени не требуют специального лечения, и в результате таких ожогов на коже не остается каких-либо шрамов. Ожоги второй степени поражают кожу на бо́льшую глубину и носят поэтому более серьезный характер. Они характеризуются появлением пузырей. Сильные ожоги с образованием пузырей при чрезмерном загорании могут служить примером ожогов второй степени. При ожогах третьей степени кожа разрушается на всю толщину. В этом случае, для того чтобы избежать появления на пораженном месте шрамов, необходимо производить пересадку кожи.

VII.40. Деление ожогов по степени их тяжести на три группы, очевидно, имеет свои недостатки, поскольку не представляется возможным провести резкое разграничение между ожогами первой и второй степени или между ожогами второй и третьей степени. Внутри каждой группы ожоги могут быть слабыми, средними или сильными. Поэтому при предварительном рассмотрении поражений, вызванных световым излучением, не всегда удается установить различие между сильным ожогом второй степени и слабым ожогом третьей степени. Однако последующее протекание болезненных процессов обычно позволяет установить такое разграничение. В дальнейшем при рассмотрении того или иного типа ожогов речь будет идти о средних поражениях.

VII.41. Глубина ожога кожи является не единственным фактором, определяющим поражающее действие светового излучения на человека. Большое значение имеют также размеры пораженных участков кожи. Так, например, ожог первой степени по всему телу может вызвать более серьезные последствия, чем ожог третьей степени на каком-нибудь одном ограниченном месте. Чем

больше размер обожженной поверхности тела, тем вероятнее появление симптомов поражения всего организма. Кроме того, имеются такие критические участки кожи (например, кожа рук), поражение которых ожогами почти любой степени выводит человека из строя.

Количество световой энергии, вызывающее ожоги, и расстояния, на которых они появляются

VII.42. Как отмечалось выше, ожог первой степени больших участков кожи человека может вывести его из строя, а ожог второй степени, даже на сравнительно ограниченном участке тела, почти всегда лишает пострадавшего всякой работоспособности. Другими словами, всем лицам, которые будут находиться на таком расстоянии от места ядерного взрыва, на котором полученная энергия светового излучения окажется достаточной для того, чтобы вызвать световые ожоги кожи второй степени, будет угрожать опасность поражения. Однако не все лица, находящиеся на таком расстоянии, будут в действительности выведены из строя, так как многие из них окажутся в известной мере защищенными от светового излучения. Но в пределах определенной зоны вероятность получения серьезных ожогов кожи будет весьма значительной.

VII.43. Чтобы рассчитать радиус зоны поражения людей, обусловливаемого ожогами, возникающими в результате действия светового излучения, испускаемого при ядерном взрыве, необходимо иметь следующие данные. Прежде всего нужно знать, какое количество энергии светового излучения будет получено при данном тротиловом эквиваленте бомбы на различных расстояниях от центра (эпицентра) ядерного взрыва. Это количество зависит от атмосферных условий и характера местности.

VII.44. Затем требуется иметь данные о количестве световой энергии, необходимой, чтобы вызвать ожоги той или иной степени, для взрывов с различной скоростью высвобождения энергии, т. е. для взрывов разной мощности и с разным временем эффективного испускания светового излучения. Эти вопросы будут рассмотрены более полно в конце данной главы; однако здесь можно отметить, что необходимые данные, характеризующие эффективность действия светового излучения при воздушных и наземных (надводных) взрывах, были получены путем теоретических расчетов, основанных на результатах опытных ядерных взрывов и лабораторных наблюдений.

VII.45. Приближенные значения количества энергии светового излучения, приходящегося на единицу площади, которые необходимы для того, чтобы вызвать ожоги кожи первой, второй и третьей степени при воздушных или наземных (надводных) ядерных взрывах с тротиловым эквивалентом 1 тыс., 100 тыс. и 10 млн. *т*

(10 мегатонн), приводятся в табл. VII.45[1]. В этой таблице энергия светового излучения выражена в калориях, а единица площади взята равной 1 *см*². Таким образом, количество световой энергии дается в калориях на 1 *см*² поверхности кожи.

Таблица VII.45

Приблизительные значения количества энергии светового излучения, вызывающего ожоги кожи при воздушных или наземных ядерных взрывах

Тротиловый эквивалент ядерного взрыва	Энергия светового излучения, *кал/см*²		
	I степень	II степень	III степень
1 тыс. *т*	2	4	6
100 тыс. *т*	2,5	5,5	8
10 млн. *т*	3,5	7	11

На практике могут иметь место некоторые отклонения величин светового импульса от приведенных в таблице значений. Эти отклонения могут быть обусловлены различием в чувствительности кожи, пигментации, а также вследствие других специфических факторов, влияющих на степень поражения световым излучением.

VII.46. Из таблицы VII.45 видно, что количество энергии светового излучения, вызывающее ожог той или иной степени, возрастает с увеличением тротилового эквивалента взрыва. Так, например, световая энергия в 4 *кал/см*² будет вызывать ожог второй степени при тротиловом эквиваленте взрыва в 1 тыс. *т*, а при ядерном взрыве с тротиловым эквивалентом в 10 млн. *т* соответствующая величина энергии составляет 7 *кал/см*². Причина этого различия состоит в том, что в первом случае световая энергия выделяется за очень короткое время продолжительностью не более нескольких десятых секунд, а во втором случае эффективное воздействие световой энергии может продолжаться в течение нескольких секунд. Как отмечалось выше (см. § VII.35), чем продолжительнее время облучения, тем большее, как правило, требуется количество энергии светового излучения, чтобы вызвать данный эффект.

VII.47. На рис. VII.47 представлен график, показывающий расстояния, на которых возможны средние ожоги первой, второй и третьей степени при изменении тротиловых эквивалентов ядерных взрывов от 1 тыс. до 20 млн. *т*. Этот график составлен с учетом

---

[1] Более подробные сведения о зависимости между количеством световой энергии, вызывающим ожоги, и тротиловым эквивалентом взрыва приведены на рис. VII.120.

зависимости количества световой энергии, вызывающей определенное поражение, от тротилового эквивалента ядерного взрыва. При построении графика были сделаны два допущения. Во-первых,

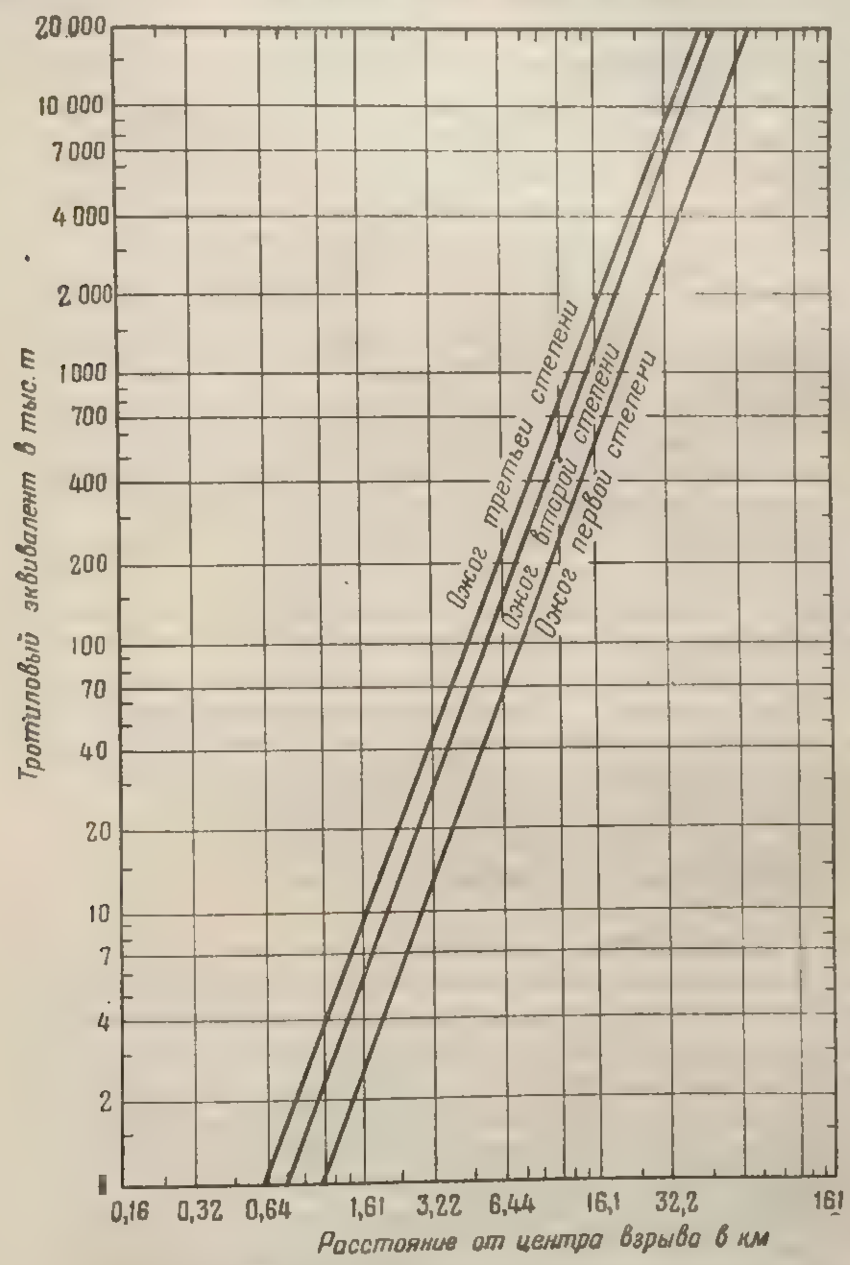


Рис. VII.47. Расстояния, на которых образуются ожоги различной степени в зависимости от тротилового эквивалента

было принято, что взрыв производится в воздухе на той же высоте, как и взрыв, для которого в главе III рассматривались значения параметров ударной волны. Для наземных (надводных) взрывов

расстояния, приведенные на рис. VII.47, следует уменьшить примерно на 40%. Во-вторых, было принято, что в момент ядерного взрыва атмосфера достаточно прозрачна, т. е. что ослабление излучения на расстоянии около 15 *км* от эпицентра взрыва почти не зависит от дальности видимости. Если в атмосфере имеется дымка, то расстояния, получающиеся на основе данных, приведенных на рис. VII.47, в особенности для взрывов ядерных зарядов с большим тротиловым эквивалентом, могут несколько превосходить действительные расстояния, на которых возможна данная степень поражения. В том случае, если ниже центра ядерного взрыва будет находиться значительный слой облаков или дыма (см. § VII.19 и далее), расстояния, определенные из рис. VII.47, могут оказаться еще более завышенными.

VII.48. Метод использования данных, приведенных на рис. VII.47, может быть проиллюстрирован на примере определения приблизительных значений предельных расстояний от места взрыва, на которых возможны ожоги второй степени для воздушного взрыва мощностью 100 тыс. *т*. Из точки на вертикальной оси, соответствующей величине тротилового эквивалента в 100 тыс. *т*, нужно провести горизонтальную линию до пересечения с кривой зависимости между расстоянием от места взрыва и тротиловым эквивалентом (вторая кривая для ожогов второй степени). Расстояние, определяемое по горизонтальной оси, соответствующее точке пересечения, составляет 5,5 *км*. Можно ожидать, что при средних атмосферных условиях и при взрыве мощностью 100 тыс. *т* средние ожоги второй степени (или более серьезные) могут быть получены на расстоянии 5,5 *км* от центра взрыва.

Эффективность второго импульса излучения

VII.49. Очень важно установить, особенно с точки зрения защиты от светового излучения, значение периода времени, в течение которого это излучение имеет наибольшую эффективность. Как уже указывалось, количество световой энергии первого импульса излучения, которое испускается в процессе понижения температуры поверхности огненного шара до первого минимума (рис. II.92), относительно невелико. Однако при этом не отпадает необходимость в определении количества лучистой энергии второго импульса, испускаемой за время, в течение которого температура огненного шара изменяется от первого минимума через максимум и до второго минимума (рис. II.92).

VII.50. С увеличением расстояния от огненного шара количество световой энергии, приходящееся на единицу площади, уменьшается. Вследствие этого более отдаленные от места взрыва объекты будут получать меньше световой энергии, чем более близкие. По мере удаления объектов от центра взрыва общее количество

световой энергии, получаемое объектом, уменьшается во всех частях импульса. Это приводит к тому, что на достаточно больших расстояниях световое излучение не будет вызывать поражения. В конечной части импульса, соответствующей относительно низким температурам огненного шара, защитные мероприятия позволяют наиболее легко ослабить световое излучение до безопасного уровня. Следовательно, на некотором расстоянии от места взрыва в конечной части импульса световое излучение может потерять свою эффективность, хотя во всех остальных частях импульса и в особенности в области температурного максимума оно будет оказывать сильное поражающее действие.

VII.51. На всех расстояниях от центра взрыва наиболее опасной областью светового импульса является та его часть, которая соответствует второму температурному максимуму огненного шара. Именно в этот период интенсивность светового излучения (или скорость испускания световой энергии огненным шаром) является наибольшей. Это приводит к тому, что количество световой энергии, достигающее объектов, находящихся на любом расстоянии от точки взрыва, за этот период будет также наибольшим. Другими словами, при ядерном взрыве определенной мощности количество световой энергии, испускаемое во втором импульсе в промежуток времени, соответствующий температурному максимуму, будет значительно больше того количества энергии, которое испускается огненным шаром в течение любого другого равного промежутка времени.

VII.52. Приведенные факты имеют важное значение для установления эффективности попыток укрыться от воздействия светового излучения. Из сказанного очевидно, что необходимые действия для обеспечения защиты желательно осуществить до достижения температурного максимума во второй части светового импульса.

VII.53. При ядерном взрыве бомбы с тротиловым эквивалентом порядка нескольких тысяч тонн необходимые действия для обеспечения защиты от светового излучения должны быть осуществлены в течение небольшой доли секунды; только в этом случае воздействие светового излучения могло бы быть в какой-то степени ослаблено. Однако поскольку это время слишком небольшое, то предпринять какие-либо защитные меры в этом случае практически невозможно. С другой стороны, если при ядерных взрывах мощностью в несколько миллионов тонн укрытие от действия светового излучения будет найдено в течение одной или двух секунд после появления огненного шара, то степень поражения световым излучением во многих случаях будет значительно уменьшена, а в некоторых случаях вообще возможно будет избежать поражения. Проблема, связанная с обеспечением защиты от действия светового излучения, будет рассмотрена более подробно в главе XII.

Защитные мероприятия, предупреждающие образование ожогов

VII.54. Если между центром взрыва и объектом, расположенным на поверхности земли, окажется какой-нибудь непрозрачный предмет (см. § VII.21), то этот предмет может значительно ослабить степень поражения объекта световым излучением.

При пребывании в здании укрыться можно в любом месте, но, конечно, в стороне от окон. Если человек находится вне здания, то некоторую защиту может обеспечить быстрое залегание в канаву или укрытие за деревом или столбом. Пожалуй, самый лучший (инстинктивный) способ действия при взрыве ядерной бомбы состоит в том, чтобы быстро лечь на землю лицом вниз за первым попавшимся прочным укрытием и спрятать открытые части тела: руки, лицо и шею (см. § XII.60 и далее).

VII.55. Обычная одежда в некоторых случаях также может обеспечить защиту от действия светового излучения и предупредить образование ожогов. Самая обычная одежда светлого цвета отражает бо́льшую часть падающего светового излучения, вследствие чего она, как правило, обеспечивает достаточную защиту. Например, оказалось, что два слоя хлопчатобумажной ткани (верхняя одежда светло-зеленого цвета и трикотажное белье), без какого-либо промежутка между ними, увеличивают количество светового излучения, вызывающее ожог второй степени, с 4 до 7,5 *кал/см²*. Если слои одежды находятся на некотором удалении друг от друга, а также и от кожи человека, то величина необходимого количества энергии возрастает еще больше. Однако поскольку воспламенение одежды может иметь место даже при сравнительно небольших значениях количества световой энергии (см. табл. VII.61), то ожоги, возникающие от загоревшейся одежды, могут образоваться и в том случае, когда величина светового импульса является недостаточной для образования мгновенных ожогов.

VII.56. Материал темного цвета поглощает излучение более эффективно, чем светлый материал. В результате поглощения светового излучения материал может очень сильно нагреться. Тепло от нагретого материала будет передаваться коже либо путем теплопроводности, либо путем излучения. Передача тепла путем теплопроводности является наиболее вероятным процессом и будет иметь особенно большое значение в том случае, когда нагретый материал соприкасается с кожей. Так, при тесном соприкосновении сильно нагретой темной ткани с телом могут появиться контактные ожоги, которые не могут быть названы ни мгновенными, ни ожогами, возникшими под воздействием пламени. Ожоги от воздействия пламени, конечно, будут появляться только в том случае, когда температура ткани будет достаточной для ее воспламенения.

VII.57. Одежда светлого цвета, изготовленная из довольно

плотного материала, отражает бо́льшую часть светового излучения, вследствие чего количество тепла, передаваемого через такую одежду коже, будет относительно небольшим. Однако могут быть случаи, когда одежда, изготовленная из светлого, но недостаточно плотного материала, будет пропускать через себя такое количество лучистой энергии, которого будет достаточно для того, чтобы вызвать ожоги на коже, в то же время сама одежда может и не воспламениться.

VII.58. Чтобы обеспечить удовлетворительную защиту от светового излучения, т. е. чтобы предупредить образование ожогов, желательно иметь не менее двух слоев одежды. Верхнюю одежду предпочтительнее иметь светлого цвета. Эта одежда должна быть свободной; в этом случае между верхней одеждой, бельем и телом будут достаточные прослойки воздуха. Для того, чтобы повысить устойчивость материала верхней одежды к воспламенению, может оказаться очень полезной соответствующая обработка ткани, в особенности ткани темного цвета.

ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ткани, дерево и пластмассы

VII.59. Выше в данной главе говорилось о поглощении различными тканями светового излучения. Ткани, изготовленные из природного волокна, например из хлопка и шерсти или из некоторых видов синтетических материалов, например искусственного шелка, обугливаются, а иногда и загораются; с другой стороны, некоторые материалы, например нейлон, при нагревании до достаточно высокой температуры плавятся. Количество световой энергии, необходимое для того, чтобы вызвать определенные изменения в той или иной ткани, зависит от ряда условий, о которых упоминалось в § VII.35. Однако в большинстве случаев справедливыми остаются следующие общие выводы.

VII.60. Ткани темного цвета, вследствие того, что они лучше поглощают излучение, повреждаются быстрее, чем такие же ткани светлого цвета. Но даже и в этом случае имеют место различия в степени повреждения в зависимости от метода окраски и в особенности от характера волокна. Шерсть оказывает большее сопротивление действию лучистой энергии, чем хлопок или искусственное волокно; последние легче поддаются воздействию светового излучения, чем нейлон. Орлон является значительно более стойким, чем нейлон. Для разрушения тканей, изготовленных из легких материалов, требуется меньше световой энергии, чем для разрушения тканей, изготовленных из тяжелых материалов. Количество энергии, вызывающей разрушение ткани (при одинаковом времени воздействия излучения), приблизительно пропорционально весу ткани, приходящемуся на единицу площади. Важным факто-

ром является также содержание влаги. Чем больше влаги содержится в ткани, тем больше энергии требуется для того, чтобы вызвать ее разрушение.

VII.61. Действие светового излучения тщательно изучалось на многих видах тканей, однако на основе полученных результатов в настоящее время еще трудно сделать обобщенные выводы ввиду наличия многих переменных величин, оказывающих значительное влияние на эффективность поражающего действия светового излучения. Тем не менее в табл. VII.61 сделана попытка показать величины энергии, вызывающие воспламенение различных тканей вследствие поглощения ими светового излучения. В этой таблице приведены данные для воздушных (или наземных) взрывов мощностью 20 тыс. и 10 млн. *т*. По тем же самым причинам, которые были рассмотрены в связи с ожогами кожи (см. § VII.35), количество светового излучения, вызывающее для данной ткани разрушения одной и той же степени, тем больше, чем выше тротиловый эквивалент ядерного взрыва.

VII.62. Древесина под воздействием светового излучения обугливается, причем глубина этого обугливания почти пропорциональна количеству поглощенной энергии. При достаточно больших количествах поглощенной энергии древесина (при соответствующих размерах и форме) может временно воспламениться; однако в условиях ядерного взрыва стойкое горение в этом случае, как правило, невозможно. Тем не менее появившееся на короткое время пламя может переброситься на находящиеся рядом другие возгораемые материалы, которые не подвергались непосредственному воздействию светового излучения. Если древесина находится в виде опилок или стружки, то она под воздействием светового излучения ядерного взрыва может довольно легко воспламеняться; об этом будет сказано ниже.

VII.63. Величина энергии светового излучения, вызывающая обугливание непокрашенной и необработанной какими-либо веществами древесины, коры сосны, ели, красного дерева и клена, составляет примерно 10—15 *кал/см²*. Древесина, окрашенная в темный цвет, обугливается сильнее; однако покраска древесины в светлые цвета и покрытие лаком оказывают защитное действие.

VII.64. Стекло обладает хорошей стойкостью к воздействию тепла, однако оно является очень хрупким, поэтому его иногда заменяют прозрачными или полупрозрачными пластмассами. В некоторых случаях, чтобы сделать стекло более прочным, слой из стекла употребляют совместно со слоем из пластмассы аналогично тому, как это делается, например, при изготовлении автомобильных ветровых стекол. Прозрачные пластмассы представляют собой обычно органические соединения и поэтому под воздействием тепла сравнительно легко разлагаются. Однако, как было установлено, многие пластмассы, такие, как бакелит, ацетат, целлюлоза, люсит, плексиглас, полиэтилен и тефлон, весьма стойки

Таблица VII.61

Приблизительные количества световой энергии, вызывающие воспламенение тканей

Материал	Вес, $г/м^2$	Количество световой энергии, вызывающее воспламенение, $кал/см^2$	
		20 тыс. *т*	10 млн. *т*
Тафта из ацетатной вискозы (вишневого цвета)	100	2	3
Хлопчатобумажная синель, постельное покрывало (светло-синее)	—	4	8
Ткань, пропитанная аэролаком, алюминизированный ацетат целлюлозы	—	18	35
Хлопчатобумажный муслин, промасленные оконные шторы (зеленые)	270	5	11
Хлопчатобумажная парусина для тентов (зеленая)	400	5	9
Хлопчатобумажная грубая ткань (коричневая)	270	6	11
Вискозная подкладочная ткань (саржа черная)	100	1	2
Хлопчатобумажные шторы (загрязненные, белые)	—	7	12
Хлопчатобумажные простыни неотбеленные, стиранные (кремовые)	100	15	30
Вискозная бельевая ткань (саржа бежевая)	100	8	16
Вискозный габардин (черный)	200	3	6
Хлопчатобумажная ткань для рубашек (коричневая)	170	7	13
Спецодежда поношенная (синяя) из грубой хлопчатобумажной ткани	340	8	13
Хлопчатобумажные и вискозные чехлы для сидений в автомобилях (темно-синие)	300	8	13
Ацетатный шантунг (черный)	100	9	15
Драпировка из ацетатного шелка (вишневая)	170	9	16
Занавеси из вискозного маркизета (светлые)	70	9	14
Спецодежда новая из хлопчатобумажной грубой ткани (синяя)	340	9	14
Хлопчатобумажная обивка сидений автомобилей (зеленая, коричневая, белая)	340	9	16
Вискозный габардин (золотистый)	240	9	20
Хлопчатобумажная тесьма для штор (белая)	—	16	30
Шерстяная фланель новая (черная)	240	8	16
Хлопчатобумажный коврик плотный (коричневый)	400	16	30
Обивка для автомобильных сидений с хлопчатобумажной основой и шерстяным верхом (серая)	440	16[1]	35[1]

[1] Устойчивого горения материала не было.

Продолжение

Материал	Вес, г/м²	Количество световой энергии, вызывающее воспламенение, кал/см²	
		20 тыс. т	10 млн. т
Покрывало из грубой шерстяной материи (серое)	240	16[1]	35[1]
Обивка для стульев из ворсистой шерсти (вишневая)	540	16[1]	35[1]
Шерстяная грубая ворсистая байка для обивки стульев (светло-коричневая)	480	16[1]	35[1]
Нейлоновый трикотаж (коричневый)	—	5[1]	10[1]
Хлопчатобумажная ткань для матрацев (серая)	—	8	16
Холст тяжелый (коричневый)	600	8	16
Прорезиненный брезент для верха автомобилей (серый)	680	16[1]	28[1]

к воздействию светового излучения. Количество световой энергии, вызывающее оплавление или потемнение этих материалов, должно составлять по крайней мере 60—70 *кал/см²*.

Количество световой энергии, вызывающее воспламенение различных материалов

VII.65. В связи с вопросом о возникновении пожаров большой интерес представляет количество световой энергии, вызывающее воспламенение различных материалов. Изучение этого вопроса проводилось как в лабораторных условиях, так и при проведении испытаний ядерного оружия. Хотя результаты этого изучения и не являются окончательными, однако они дают возможность сделать общий вывод относительно количества энергии светового излучения, которое необходимо для того, чтобы вызвать воспламенение того или иного материала. Данные, приведенные в табл. VII.65, разделены на две части; в первой части таблицы данные относятся к предметам домашнего обихода, а во второй — к материалам, воспламенение которых может вызвать лесной пожар. Очевидно, вблизи многих зданий имеются также возгораемые материалы, способные воспламениться под воздействием энергии, величина которой равна 3 *кал/см²*.

Любые тканевые изделия домашнего обихода, как правило, воспламеняются при воздействии на них энергии светового излучения в количестве 10 *кал/см²*.

[1] Устойчивого горения материала не было.

Таблица VII.65

Количество световой энергии, вызывающее воспламенение различных материалов

Материал	Вес, $г/м^2$	Количество световой энергии, вызывающее воспламенение, $кал/см^2$	
		20 тыс. *т*	10 млн. *т*
Швабра	—	3	5
Обрывки газетной бумаги	70	2	4
Бумага крепованная (зеленая)	35	4	8
Отдельный газетный лист	70	3	6
Газеты, сложенные пачкой (поверхность открыта)	—	3	6
Газеты мятые, подвергавшиеся атмосферным влияниям	35	3	6
Газеты мятые	70	4	8
Хлопчатобумажный обтирочный материал (маслянисто-серый)	—	5	8
Бумага писчая новая (белая)	70	15	30
Отдельный лист оберточной бумаги (коричневый)	35	7	14
Спички в бумажной обложке (голубые головки открытые)	—	5	9
Целлюлозная губка новая (розовая)	1300	6	10
Бристольский картон трехслойный (темный)	340	8	15
Бристольский картон трехслойный (белый)	340	12	25
Крафт-картон, бывший в употреблении (коричневый)	540	8	15
Крафт-картон с неровными кромками, бывший в употреблении (коричневый)	—	12	25
Соломенный веник (желтый)	—	8	17
Сосновая стружка (светло-желтая)	—	5	12
Жесткая щетка из волокна „Тампико", бывшая в употреблении (грязно-желтая)	—	10	20
Жесткая щетка из волокон „Пельнетто", бывшая в употреблении (ржавого цвета)	—	12	25
Кожа тонкая (коричневая)	200	15[1]	30
Плетение из соломы (старое желтое)	440	16[1]	33[1]

[1] При воздействии указанного количества энергии светового излучения воспламенение материала в стойкое горение не переходит.

Продолжение

Сухие возгораемые материалы в лесу

Материал	Количество энергии светового излучения, вызывающее воспламенение, *кал/см²*	
	20 тыс. *т*	10 млн. *т*
Сухая гнилая древесина	4	9
Мелкая трава	5	10
Опавшие листья	6	12
Иглы белой сосны	6	14
Крупная трава	7	16
Еловые иглы	8	17
Иглы сосны Пондероза, коричневые	8	18

VII.66. Что касается горючих материалов, находящихся в лесу, то величина энергии светового излучения, вызывающая их воспламенение, в значительной степени зависит от количества влаги, содержащейся в этих материалах. При составлении таблицы VII.65 было принято, что листья и трава являются достаточно сухими, поэтому количество энергии, вызывающее их воспламенение, характеризуется минимальными величинами. Воспламенение под действием светового излучения имеющегося в лесу сухого материала может явиться причиной возникновения пожара, который затем может распространиться на другие участки леса.

Зависимость энергии светового излучения от расстояния

VII.67. Для использования данных таблиц VII.61 и VII.65 с целью определения расстояний от центра взрыва (при данном тротиловом эквиваленте ядерного заряда), на которых будет происходить воспламенение того или иного материала, необходимо установить для данной мощности взрыва зависимость энергии светового излучения от расстояния. График такой зависимости показан на рис. VII.67; данный график построен в предположении, что взрывы производятся в достаточно прозрачной атмосфере.

VII.68. Предположим, что необходимо определить расстояние, на котором можно ожидать возникновения пожаров под воздействием светового излучения, испускаемого при воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*. Количество энергии светового излучения, вызывающее в средних условиях возникновение пожара, может быть определено из табл. VII.65; из этой таблицы видно, что эта величина составляет около 5 *кал/см²*

Далее, отыскав на вертикальной оси (рис. VII.67) точку, соответствующую тротиловому эквиваленту в 1 млн. *т*, проводим из

этой точки горизонтальную линию до пересечения с линией, соответствующей количеству энергии в 5 *кал/см²*. Полученная точка, как видно из графика, соответствует расстоянию в 16 *км* от цен-

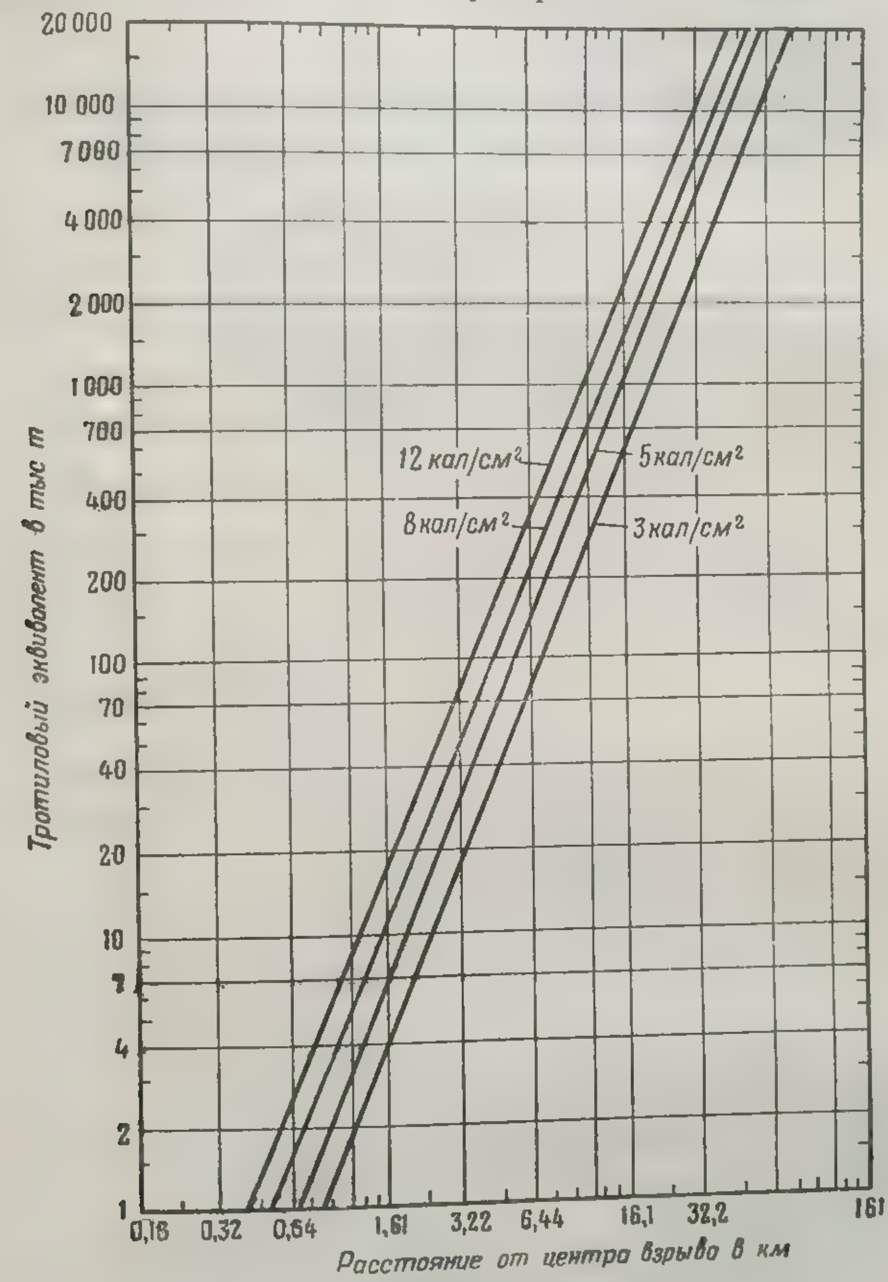


Рис. VII.67. Зависимость между количеством энергии светового излучения, падающим на единицу поверхности, расстоянием от центра взрыва и тротиловым эквивалентом

тра взрыва. На этом расстоянии могут возникать пожары в результате непосредственного поглощения светового излучения. В том случае, когда атмосфера недостаточно прозрачна, или при назем-

ном (надводном) взрыве расстояния, полученные из графика, могут быть уменьшены. Расстояния будут уменьшаться также при наличии между объектом и центром взрыва слоя плотных облаков или дыма (см. § VII.21 и далее).

ДЕЙСТВИЕ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ НАД ЯПОНСКИМИ ГОРОДАМИ

Световые ожоги

VII.69. Одним из наиболее существенных результатов ядерных взрывов, произведенных над японскими городами, явилось поражение большого числа людей в результате воздействия светового излучения. Положение усугубилось тем, что атмосфера была прозрачной и что летняя одежда людей была очень легкой. Подсчитано, что от 20 до 30% людей, погибших в Хиросима и Нагасаки, умерло от световых ожогов, не считая тех людей, которые пострадали от ожогов, возникших в результате пожаров. Ожоги, явившиеся следствием воздействия светового излучения, были зарегистрированы в Нагасаки на расстоянии около 4 *км* от эпицентра взрыва. На этом расстоянии количество световой энергии, согласно подсчетам, составляло около 2 *кал/см²*; в Хиросиме это расстояние было несколько меньше. Как и следовало ожидать, количество мгновенных ожогов с увеличением расстояния от центра взрыва было меньшим.

VII.70. Отличительная особенность ожогов кожи, образовавшихся в результате воздействия светового излучения, заключалась в том, что они ограничивались поверхностью тела, которая была обращена к центру взрыва. По этой причине такие ожоги иногда называют «профильными ожогами» (рис. VII.70). Это явление объясняется тем, что бóльшая часть излучения распространяется прямолинейно от огненного шара, и поэтому поражались только те участки, которые находились под прямым воздействием светового излучения. Примером этого явления может служить такой случай: у человека, который сидел за столом у окна и писал, руки были сильно обожжены, однако лицо и шея, которые ничем не были закрыты, получили лишь слабые ожоги, так как излучение проходило через окно под таким углом, что эти части тела частично находились в тени.

VII.71. Хотя световые ожоги большей частью наблюдались лишь на обнаженных участках тела, однако были и такие случаи, когда ожоги образовывались, несмотря на то, что тело было закрыто одним, а в отдельных случаях и несколькими слоями ткани. Такого рода ожоги наблюдались лишь на небольших расстояниях от эпицентра взрыва, когда пострадавшие подвергались воздействию очень большого количества лучистой энергии. Ожоги, явившиеся следствием поглощения излучений одеждой, образовыва-



Рис. VII.70. Световые ожоги, полученные на расстоянии 2 *км* от эпицентра взрыва (защитное действие предметов одежды — часть головы, покрытая фуражкой, не подверглась действию светового излучения)

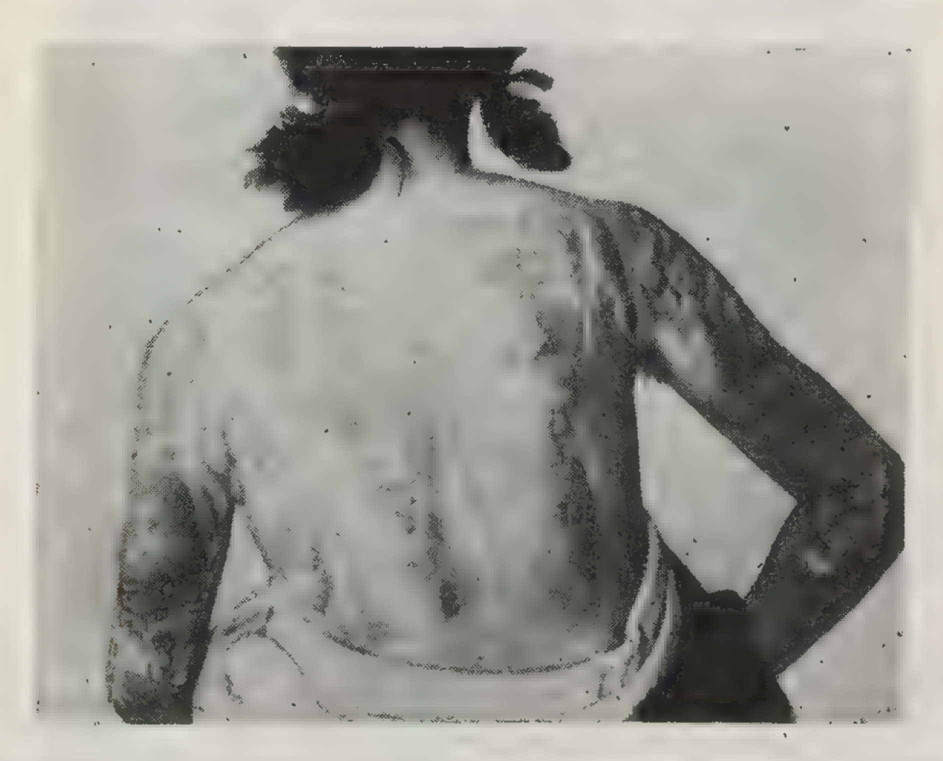


Рис. VII.71. Ожоги кожи в местах соприкосновения с одеждой. Защитное действие одежды проявилось на плечах и на спине

лись, как правило, только в тех местах, на которых ткань очень плотно прилегала к коже, например, на локтях и на плечах. Эти ожоги были вызваны не прямым воздействием светового излучения, а тепловой энергией сильно нагретой ткани, как это отмечалось в § VII.57. Участки тела, на которых одежда лежала свободно и отделялась от кожи прослойкой воздуха, как правило, не были поражены излучением (рис. VII.71).

VII.72. В Японии было зарегистрировано много случаев, когда у одного и того же человека, носившего одежду из ткани различной расцветки, ожоги образовывались только в тех местах, которые прикрывались темными участками ткани, что объяснялось отражением светового излучения светлыми участками ткани. Темные участки ткани поглощали большое количество излучений, нагревались до высоких температур и вследствие этого способствовали



Рис. VII.72. Ожоги на коже соответствуют темным пятнам рисунка кимоно

образованию контактных ожогов (рис. VII.72). В некоторых случаях верхняя одежда черного цвета воспламенялась, от нее загоралось нижнее белье, и в результате этого ожоги образовывались вследствие воздействия пламени. Необходимо, однако, помнить, что одежда светлого цвета может и не обеспечить защиту от воздействия светового излучения (см. § VII.57). Это объясняется тем, что некоторые светлые материалы пропускают такое количество излучения, которое достаточно для того, чтобы вызвать ожоги.

Другие виды действия светового излучения

VII.73. Помимо воспламенения материалов, приводившего к возникновению пожаров (о чем дополнительно будет сказано ниже), в Японии наблюдались и другие явления, которые свидетельствуют о поглощении значительных количеств энергии светового излучения. Тканевая обивка мебели и другие предметы из



Рис. VII.73а. Обугливание материала обивки мягкой мебели в результате действия светового излучения, прошедшего через окно, при взрыве в Хиросима (1600 *м* от эпицентра взрыва)

тканей (рис. VII.73а), деревянные столбы (рис. VII.73б), а также деревья, находившиеся в радиусе до 3300 *м* от эпицентра взрыва в Нагасаки и до 2700 *м* в Хиросима (в этих зонах минимальное количество светового излучения составляло от 3 до 4 *кал/см*^{2}), если не уничтожались пожарами, то подвергались, как правило, обугливанию. Обугливание происходило с той стороны, которая была

обращена к месту взрыва. В тех местах, где здания, отдельные стены, холмы и пр. оказывали экранирующее действие, признаков поражающего воздействия светового излучения не обнаруживалось.



Рис. VII.73б. Обугливание поверхности деревянных столбов в результате действия светового излучения при ядерном взрыве в Нагасаки (1800 *м* от эпицентра взрыва). Нижние части столбов оказались необугленными вследствие защитного действия заборов

VII.74. Интересный случай экранирующего действия преграды был зарегистрирован в Нагасаки. Верхушки и верхние части ряда

деревянных столбов сильно обуглились, однако обугленный участок был резко ограничен тенью, которую создавала стена. При этом стена была полностью разрушена ударной волной, действие которой проявилось после светового излучения. Как указывалось выше, световое излучение распространяется со скоростью видимого света, в то время как ударная волна распространяется гораздо медленнее (см. § III.14).



Рис. VII.75а. Потемнение асфальтированного покрытия на мосту в Хиросима под воздействием светового излучения. Места, оставшиеся светлыми, были защищены перилами моста. Длина и направление „теней" указывают на направление взрыва

VII.75. Наблюдения за тенями, образовавшимися в результате экранирования отдельных участков поверхностей некоторыми предметами, находившимися под непосредственным воздействием светового излучения (рис. VII.75а и б), позволили довольно точно определить направление на центр взрыва, а изучение таких теней в различных пунктах вокруг места взрыва дало возможность установить высоту взрыва. При помощи случайно найденной и четко выраженной полутени удалось определить диаметр огненного шара

в тот момент, когда интенсивность светового излучения была максимальной.

VII.76. Одним из поразительных примеров воздействия светового излучения было то, что полированный гранит под непосредственным воздействием излучения стал шероховатым. Это было объяснено неравномерностью расширения кристаллов, из которых состоит гранит. Установлено, что для того, чтобы вызвать такой



Рис. VII.75б. Краска на газгольдере под воздействием светового излучения при взрыве в Хиросима выгорела; исключение составляют участки, защищенные вентилем (2100 *м* от эпицентра взрыва)

эффект, температура должна была составлять по крайней мере 600° С. Подобные наблюдения были использованы для определения максимальной температуры на поверхности земли в момент ядерного взрыва. В § VII.32 отмечалось, что температура в момент взрыва была чрезвычайно высокой, в особенности вблизи эпицентра взрыва.

VII.77. Другим примером воздействия светового излучения, который оказался весьма ценным для последующих исследований, было образование пузырей на темно-зеленой (почти черной) пористой поверхности черепицы, которая широко используется в Японии как кровельный материал (рис. VII.77). Это явление было зафиксировано на расстоянии до 1300 *м* от центра взрыва (количество энергии светового излучения составляло около 40 *кал/см²*). Размеры пузырей и их количество увеличивались по мере приближения к месту взрыва. Кроме того, их характер изменялся также

в зависимости от угла наклона поверхности черепицы. При испытании такой же неповрежденной черепицы в лабораторных условиях было установлено, что аналогичные пузыри образуются в течение четырех секунд после достижения температуры 1800° C, хотя при этом черепица разрушается на бóльшую глубину. На основании полученных результатов испытания было установлено, что при ядерном взрыве в Японии температура на указанном выше расстоянии превышала 1800° C. Такая температура была в течение промежутка времени, меньшего, чем 4 секунды.

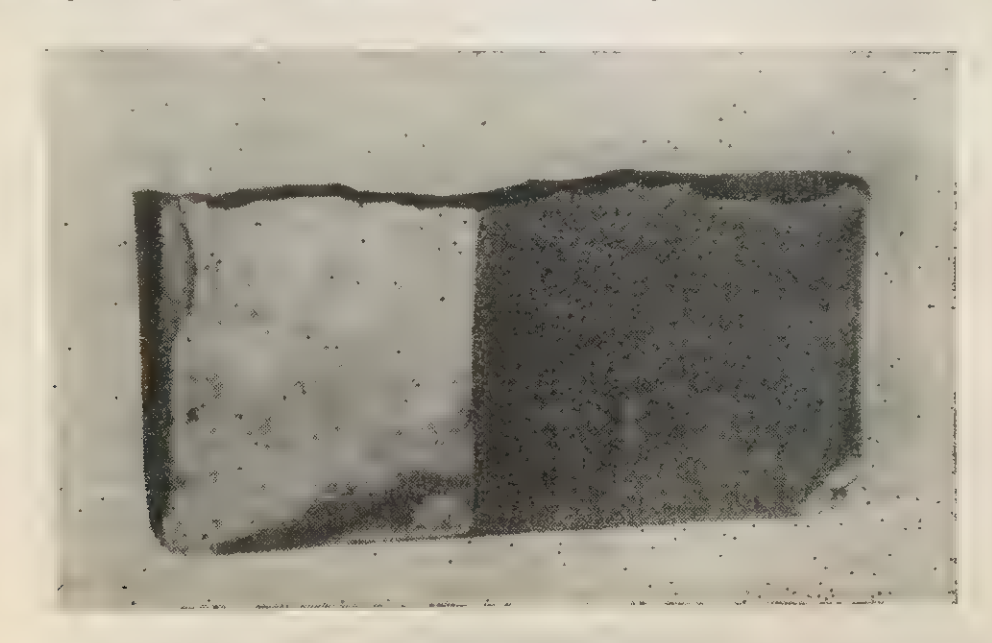


Рис. VII.77. Образование пузырей на поверхности кровельной черепицы в результате воздействия светового излучения при взрыве в Хиросима. Левая часть черепицы была защищена перекрывающей черепицей (600 *м* от эпицентра взрыва)

VII.78. Разница в поведении светлых и темных тканей при воздействии на них светового излучения ядерных взрывов, произведенных в Японии, также представляет значительный интерес. Светлые ткани либо отражают, либо пропускают через себя бóльшую часть падающего на них светового излучения. По этой причине количество светового излучения, поглощаемое такими тканями, очень мало. Это приводит к тому, что светлые ткани не нагреваются до таких высоких температур, до которых нагреваются темные ткани. Вследствие того, что температура нагрева темных тканей выше, чем светлых, степень повреждения их значительно больше. В одном случае, например, на полосатой мужской рубашке темные полосы выгорели, в то время как светлые остались неповрежденными (рис. VII.78). Точно так же лист бумаги, исписанный черными чернилами, находившийся на расстоянии около 2400 *м* от эпицентра

взрыва (5 *кал/см*²), выгорел только в тех местах, на которых были чернила, тогда как остальная часть бумаги почти не пострадала.

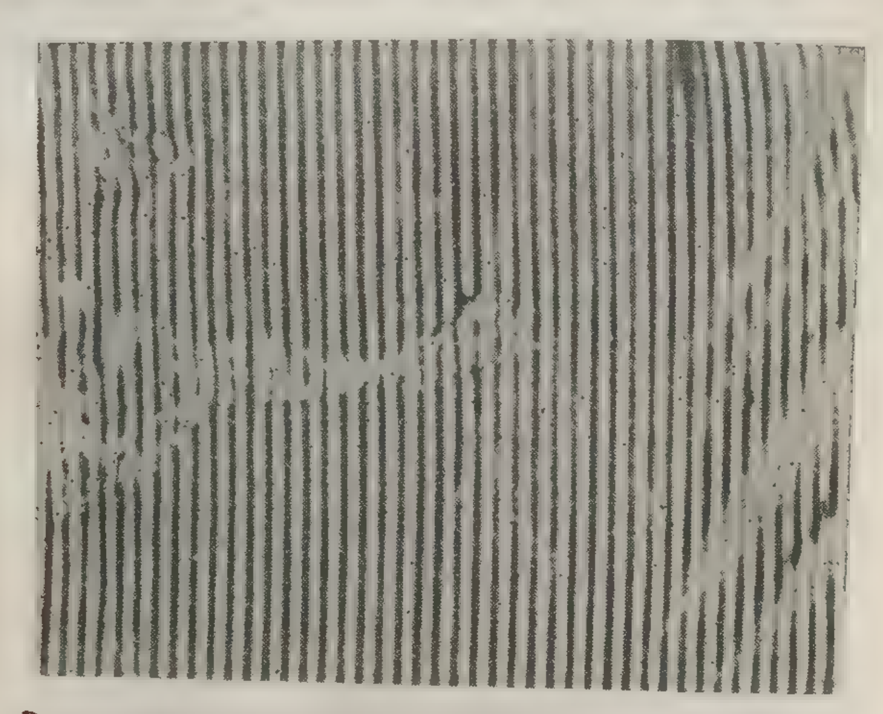


Рис. VII.78. Светлые участки ткани остались неповрежденными, темные полосы в результате действия светового излучения частично обуглились

ЗАЖИГАТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ

Возникновение пожаров

VII.79. При ядерном взрыве пожары могут возникать в основном по двум причинам. Во-первых, вследствие воспламенения целого ряда материалов (бумаги, мусора, оконных занавесей, тентов над окнами, сухой травы, листьев, стружки и др.), возникающего в результате непосредственного поглощения ими светового излучения. Во-вторых, вследствие разрушений, вызываемых ударной волной; в этом случае пожары могут возникать из-за опрокидывания печей, короткого замыкания электросетей и повреждений газовых линий. Независимо от способа возникновения пожара его дальнейшее распространение будет определяться количеством и распределением возгораемых материалов, находящихся вблизи очага пожара. Поэтому распространение пожаров, сопровождающих ядерный взрыв, зависит от двух факторов: 1) количества очагов пожара и 2) характера района, в котором возникли эти очаги.

VII.80. Условия, при которых возникают вторичные (или косвенные) пожары, проанализировать трудно; однако имеются некоторые особенности, характерные для пожаров, возникающих при не-

взрыва (5 *кал/см*^{2}), выгорел только в тех местах, на которых были чернила, тогда как остальная часть бумаги почти не пострадала.

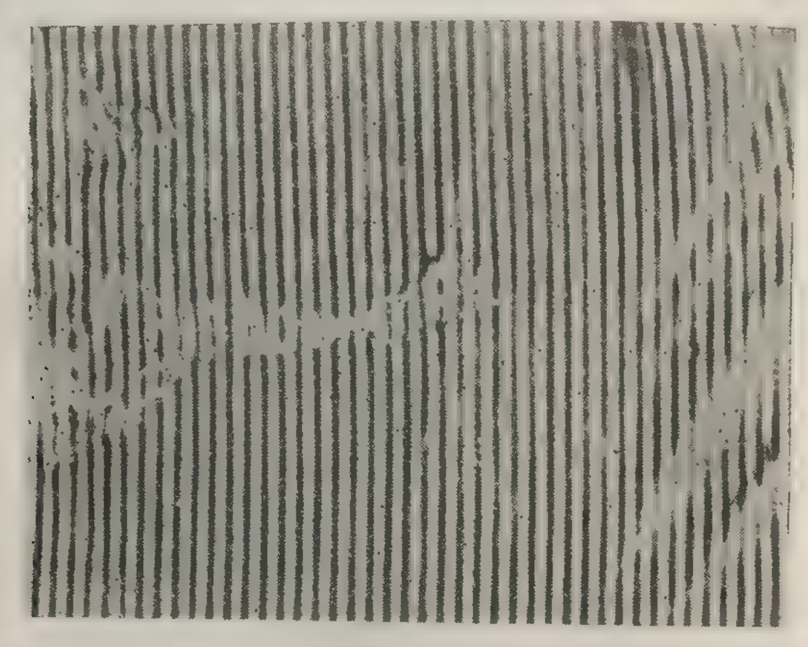


Рис. VII.78. Светлые участки ткани остались неповрежденными, темные полосы в результате действия светового излучения частично обуглились

ЗАЖИГАТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ

Возникновение пожаров

VII.79. При ядерном взрыве пожары могут возникать в основном по двум причинам. Во-первых, вследствие воспламенения целого ряда материалов (бумаги, мусора, оконных занавесей, тентов над окнами, сухой травы, листьев, стружки и др.), возникающего в результате непосредственного поглощения ими светового излучения. Во-вторых, вследствие разрушений, вызываемых ударной волной; в этом случае пожары могут возникать из-за опрокидывания печей, короткого замыкания электросетей и повреждений газовых линий. Независимо от способа возникновения пожара его дальнейшее распространение будет определяться количеством и распределением возгораемых материалов, находящихся вблизи очага пожара. Поэтому распространение пожаров, сопровождающих ядерный взрыв, зависит от двух факторов: 1) количества очагов пожара и 2) характера района, в котором возникли эти очаги.

VII.80. Условия, при которых возникают вторичные (или косвенные) пожары, проанализировать трудно; однако имеются некоторые особенности, характерные для пожаров, возникающих при не-

посредственном воздействии светового излучения. Наиболее важным фактором является так называемая **плотность очагов воспламенения.** Эта плотность представляет собой количество пунктов на единице площади, в которых могут находиться возгораемые материалы, аналогичные тем, о которых говорилось в предыдущем параграфе. Как правило, эти материалы могут загореться в том случае, если они окажутся под воздействием энергии светового излучения, величина которой составляет 3—5 *кал/см*². Данные,

Район	Количество наружных очагов пожаров на площади в один акр (0,4 *га*)
Оптовой торговли; жилой с очень плохими домами (трущобами)	
Розничной торговли	
Жилой, плохо благоустроенный	
Мелкого производства	
Деловой и розничной торговли	
Жилой, хорошо благоустроенный	
Крупного производства	

5 10 15 20 25 30

Рис. VII.80. Возможное количество внешних очагов пожаров для различных районов города

приведенные на рис. VII.80, получены на основе изучения структуры ряда крупных городов Соединенных Штатов. Из этих данных видно, что количество точек, в которых может произойти воспламенение различных материалов, является наибольшим в районах оптовой торговли и в районах трущоб и наименьшим в хороших жилых кварталах или крупных промышленных районах [1]. Во всех районах наиболее распространенным, легко возгораемым материалом является бумага; исключение составляют деловые районы с магазинами розничной торговли, где основным источником пожаров являются тенты из парусины.

VII.81. Плотность точек возможного воспламенения дает некоторое представление о вероятности возникновения пожаров при идеальных условиях погоды. Однако результаты, приведенные на рис. VII.80, сами по себе не являются достаточными для подсчета количества крупных пожаров, которые фактически могут возник-

[1] Типы районов заимствованы из классификации, применяемой американским бюро переписи.

нуть при ядерном взрыве. Прежде всего в районе эпицентра взрыва, где количество световой энергии превышает 12 *кал/см*², почти все возгораемые материалы будут охвачены пламенем (табл. VII.65). С другой стороны, на больших расстояниях от места взрыва загораться будут лишь те материалы, которые особенно легко воспламеняются. Кроме того, образование значительного очага пожара, способного к дальнейшему распространению, потребует, чтобы поблизости от этого очага находилось большое количество возгораемого материала; однако последнее не всегда будет иметь место.

VII.82. Скопление возгораемого мусора вблизи деревянной постройки представляет собой реальную угрозу возникновения пожара, что было подтверждено при ядерных испытаниях, проведен-



Рис. VII.82. Деревянные дома, построенные для целей испытания перед ядерным взрывом (полигон в штате Невада)

ных в штате Невада в 1953 г. Во время этих испытаний три небольших деревянных дома, каждый из которых имел двор, окруженный деревянным забором, подверглись воздействию энергии светового излучения в количестве 12 *кал/см*². Один дом (рис. VII.82, слева) имел обшивку из сгнивших досок, однако во дворе не было мусора. Двор соседнего дома также был чистым, но обшивка этого дома была покрашена и находилась в хорошем состоянии (рис. VII.82, в центре). У третьего дома обшивка была в плохом состоянии и во дворе имелось много мусора (рис. VII.82, справа).

VII.83. Состояние этих трех домов после ядерного взрыва показано на рис. VII.83. Третий дом (справа) вскоре после взрыва был охвачен пламенем и сгорел до основания. Первый дом (слева) загорелся, но целиком был охвачен пламенем только через 15 ми-

нут. Дом, находившийся в хорошем состоянии (в центре), с чистым двором, был лишь частично поврежден от действия светового излучения. Интересно отметить, что поверхности этого деревянного дома, покрашенные белой краской, под воздействием световой энергии, количество которой составляло примерно 25 *кал/см²*, сильно обуглились, но не загорелись (рис. VII.34б).

VII.84. В ходе испытаний 1953 г. подтвердилось также большое значение для противопожарной безопасности огнестойких материалов, применяемых для внутренней отделки домов. Во время испы-



Рис. VII.83. Деревянные дома после воздействия на них ядерного взрыва

таний два одинаковых по прочности дома (каждый из них имел окно размером 1,2×1,8 *м*, обращенное в сторону взрыва) подверглись воздействию энергии светового излучения в количестве 17 *кал/см²*. В одном доме внутренние стены были обиты искусственным шелком, на полу были хлопчатобумажные коврики и на окнах занавески. Как и ожидалось, этот дом был охвачен пламенем сразу же после взрыва и сгорел полностью. В другом доме для обивки стен была употреблена виниловая пластмасса, а коврики и занавески были шерстяными. Хотя огонь вспыхнул во многих местах, однако пожарная группа, которая вошла в дом через час после взрыва, сумела ликвидировать пожар.

VII.85. Имеется еще один вопрос, на котором следует остановиться в связи с проблемой возникновения пожаров под воздействием светового излучения. Речь идет о том, возможно ли тушение пламени, появившегося от воздействия светового излучения,

ударной волной, образующейся при ядерном взрыве. Вначале предполагалось, что некоторые факты, наблюдавшиеся в Японии, дают положительный ответ на этот вопрос (см. § VII.92). Однако такие случаи были исключительно редкими. При изучении этого вопроса были использованы как результаты ядерных взрывов в Японии, так и результаты различных ядерных испытаний, и общий вывод, который был сделан на основе полученных материалов, состоит в том, что воздушная ударная волна пламени почти не сбивает (см. § VII.93).

Распространение пожаров

VII.86. Распространение пожаров в городе зависит от многих факторов, например от условий погоды, характера местности, плотности застройки и огнестойкости конструкций зданий. Однако детальное изучение крупных пожаров показало, что при всех прочих более или менее одинаковых условиях наиболее важным критерием, определяющим вероятность распространения пожаров в данном районе, является расстояние между зданиями. Из общего рассмотрения этого вопроса следует, что чем меньше плотность застройки данного района, тем меньше вероятность распространения огня от одной постройки к другой. Кроме того, чем больше расстояние между зданиями, тем больше имеется возможностей ликвидировать пожар.

VII.87. Кривая, показанная на рис. VII.87, дает некоторое представление об изменении вероятности распространения огня, выраженной в процентах, в зависимости от среднего расстояния между зданиями в городе. На эту зависимость оказывают влияние типы построек (их огнестойкость), а также размеры разрушений, вызываемых ударной волной (см. § VII. 79). Следует отметить, что данные, приведенные на рис. VII.87, относятся к такому случаю, когда в результате непосредственного воздействия светового излучения и других косвенных причин имеет место возникновение большого количества небольших очагов огня.

VII.88. Большие лесные пожары являются, как правило, результатом начального воспламенения сухих листьев, травы и сухого гнилого дерева, вызываемого действием светового излучения. К числу факторов, которые влияют на развитие таких пожаров, относятся количество влаги, содержащейся в деревьях, топографические и метеорологические условия. Небольшая влажность в атмосфере, сильный ветер и ровная местность способствуют развитию лесных пожаров. Как правило, лиственный лес, в особенности, когда деревья имеют листья, будет загораться не так быстро и гореть будет с меньшей интенсивностью, чем хвойный. Зеленые листья и стволы деревьев будут экранировать световое излучение, поэтому количество очагов пожара в лесу может быть меньшим, чем это может показаться на первый взгляд.

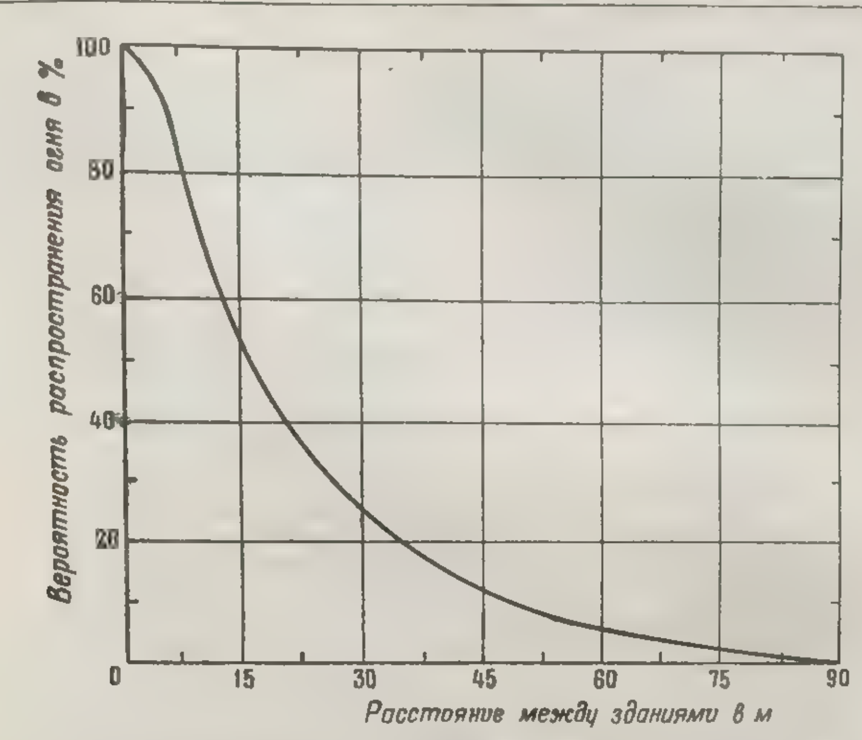


Рис. VII.87. Вероятность распространения пожаров в зависимости от среднего расстояния между зданиями в городе

ЗАЖИГАТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ В ЯПОНИИ

Ядерная бомба как зажигательное оружие

VII.89. Зажигательное действие ядерного взрыва не отличается какими-то чрезвычайными особенностями. В принципе тот же самый общий результат (с точки зрения характера разрушения огнем и ударной волной) может быть достигнут при применении обычных зажигательных и фугасных бомб. Подсчитано, например, что ущерб, причиненный в Хиросима пожарами, можно было бы получить, сбросив на город около 1000 *т* зажигательных бомб (при равномерном распределении их по всему городу). Однако ясно, что, поскольку разрушение города было вызвано действием единственной ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом всего лишь в 20 тыс. *т*, ядерное оружие в состоянии причинять огромные разрушения огнем, как и ударной волной.

VII.90. При ядерных взрывах в Японии были зафиксированы факты, которые свидетельствуют о том, что разрушения, связанные с пожарами, вызываемыми световым излучением, зависят от характера местности и метеорологических условий гораздо больше, чем разрушения, вызываемые ударной волной. Как в Хиросима, так и в Нагасаки радиусы зон разрушений, вызываемых действием ударной волны, были примерно одинаковыми. Однако радиусы зон, в которых проявлялось зажигательное действие светового из-

лучения, были совершенно разными. В Хиросима, например, величина общей площади, сильно пострадавшей от огня (около 11,4 *км*²), была примерно в 4 раза больше, чем в Нагасаки. Одна из причин этого заключалась в том, что местность в районе Нагасаки была более холмистой, чем в районе Хиросима. Масштабы разрушений в Нагасаки можно было бы, вероятно, увеличить путем изменения положения центра взрыва. Тем не менее важным фактором, определившим масштабы этих разрушений, было различие в характере местности и связанной с ним плотности застройки. Хиросима находится на относительно ровной местности, и плотность застройки в этом городе очень большая, в то время как в Нагасаки в районе эпицентра взрыва находилась холмистая часть города, где построек было очень мало.

Возникновение и распространение пожаров в Японии

VII.91. По результатам наблюдений, произведенных в Японии, было установлено, что при воздействии светового излучения тонкая темная хлопчатобумажная ткань, которая широко применялась во время войны для изготовления светомаскировочных штор, тонкая бумага и сухое гнилое дерево воспламенялись на расстоянии до 1 *км* от эпицентра взрыва. Количество световой энергии на этом расстоянии составляло примерно 35 *кал/см*². Был известен факт, когда загорелась крыша дома, находившегося на большем расстоянии. Возможно, что в отдельных местах причиной возникновения пожаров было чрезмерное увеличение количества излучения вследствие отражения, рассеяния и фокусирования. Это явление иллюстрирует рис. VII.91.

VII.92. В Нагасаки был зарегистрирован случай воспламенения упаковочного ящика из прочных досок на расстоянии примерно в 1,6 *км* от эпицентра взрыва. На этом расстоянии количество световой энергии составляло приблизительно 15 *кал/см*². Ящик обуглился со стороны, обращенной к взрыву. Однако почернение было замечено также и в щелях, в отверстиях для гвоздей, а также в других местах, куда световое излучение не проникало. Вероятно, это можно объяснить тем, что поверхность ящика под действием светового излучения воспламенилась и пламя проникло в трещины, отверстия и другие места и поддерживалось там в течение нескольких секунд, после чего оно было потушено ударной волной.

VII.93. На основе наблюдений над обугливанием древесины, которые велись как в Хиросима, так и в Нагасаки, первоначально был сделан вывод о том, что древесина под действием светового излучения воспламеняется и что вслед за этим огонь тушится ударной волной. Однако в настоящее время кажется более вероятным, что, за исключением некоторых особых случаев, древесина, как правило, не воспламеняется. Поглощение световой энергии приводило к обугливанию здоровой древесины, однако температура обычно



Рис. VII.91. Верхняя часть деревянного столба под действием светового излучения при взрыве в Хиросима сгорела (2000 *м* от эпицентра взрыва); другие объекты в непосредственной близости от столба не были подожжены. Ближайший сгоревший дом был на удалении 110 *м*

оказывалась недостаточно высокой для ее воспламенения (см. § VII.34). Было зарегистрировано много случаев, когда гнилая древесина и стружка сгорали полностью; ударная волна в этих случаях большого влияния на пламя не оказывала.

VII.94. Очень трудно установить, в какой мере действие светового излучения являлось непосредственной причиной возникновения пожаров при ядерных взрывах в Японии. Возможно, что на расстоянии, равном примерно 1,6 *км* от эпицентра, некоторые пожары возникали под влиянием вторичных факторов, таких, как опрокидывание печей, короткое замыкание электросетей, повреждений газопроводов и т. д., которые являлись прямым следствием воздействия ударной волны. Некоторые пожары на промышленных предприятиях возникли из-за опрокидывания производственных печей и котлов или в результате того, что стены и перекрытия зданий под воздействием ударной волны обрушивались на них.

VII.95. После начала пожаров их дальнейшее распространение обусловливалось влиянием некоторых факторов, непосредственно связанных с разрушениями, вызываемыми ударной волной ядерного взрыва. Так, например, вследствие того, что действие ударной волны вызвало разрушение окон, выбивание или повреждение металлических жалюзи (рис. VII.95), срывание крыш и стеновых па-



Рис. VII.95. Металлические жалюзи в результате действия ударной волны при взрыве в Хиросима (около 900 *м* от эпицентра взрыва) были сорваны и отброшены внутрь помещения либо повреждены (жалюзи в центре фотоснимка были смещены наружу ударной волной, проникшей внутрь помещения)

нелей, а также обрушение стен и крыш, многие здания стали более уязвимыми для огня. Распространение пожаров внутри огнестойких зданий во многих случаях облегчалось разрушением лестниц, лифтов, брандмауэров, противопожарных перегородок, а также из-за обрушения междуэтажных перекрытий и перегородок (рис. IV.85г).

VII.96. С другой стороны, объятые пожаром деревянные здания после обрушения, вызываемого действием ударной волны, горели не столь интенсивно, как это было бы в том случае, если бы они остались целыми. Обломки огнестойких конструкций во многих случаях закрывали горючие материалы и препятствовали их горению. Все это не позволяет установить, являлось ли действие ударной волны благоприятствующим или препятствующим фактором при распространении пожаров в Хиросима и Нагасаки.

VII.97. Хотя в японских городах постройки и разделялись в отдельных случаях реками, дорогами и незастроенными участками, однако это обстоятельство мало мешало распространению пожаров, что объяснялось тем, что пожары очень часто возникали одновременно по обе стороны реки или дороги и поэтому последние не имели существенного значения. Кроме того, горевшие материалы в результате действия ударной волны часто перебрасывались на большие расстояния. Тем не менее было зафиксировано несколько случаев, когда интервалы между постройками помогли предотвратить возникновение пожаров в некоторых огнестойких зданиях.

VII.98. Одной из важных особенностей применения ядерных бомб в Японии являлось то, что в обширном районе вследствие разрушений, вызванных ударной волной, пожарная служба была полностью выведена из строя. Правда, с точки зрения американских требований организация пожарной службы и качество противопожарной техники были плохими, однако пожарная служба вряд ли смогла бы сделать больше даже в том случае, если бы качество пожарных команд было лучше. В Хиросима, например, в результате разрушений пожарных депо было уничтожено 70% противопожарного оборудования и около 80% личного состава не могло принять участия в тушении пожаров. Даже в том случае, если бы люди и машины не пострадали от действия ударной волны, они все равно не смогли бы ничего сделать, так как к очагам пожаров нельзя было приблизиться из-за того, что улицы были завалены обломками.

По этой причине, а также из опасения быть заваленными пожарные команды, находившиеся в Нагасаки в уцелевших районах, были не в состоянии приблизиться к эпицентру взрыва ближе чем на 2000 *м*. Поэтому почти все здания, находившиеся в зоне с этим радиусом, оказались уничтоженными.

VII.99. Другим фактором, который привел к увеличению разрушений, вызванных действием огня, как в Хиросима, так и в На-

гасаки, был выход из строя системы водоснабжения. Насосные станции сильно не пострадали, однако серьезно были повреждены распределительные и магистральные трубопроводы, в результате чего произошла утечка воды и снизилось ее давление. Бóльшая часть водопроводных линий, проложенных в зданиях, была разрушена обломками, образовавшимися при разрушении этих зданий, а также вследствие расплавления труб под воздействием огня. Некоторые проложенные под землей водопроводные магистрали также были выведены из строя, а другие оказались разрушенными из-за обвала или деформации мостов, по которым они были проложены (§ IV.113).

«Огненный шторм» в Хиросима

VII.100. Примерно через 20 минут после взрыва ядерной бомбы в Хиросима наблюдалось явление, известное под названием «огненного шторма». Огненный шторм представлял собой совокупность воздушных потоков (ветров), двигавшихся с большой скоростью к центру горевшего района. Скорость этих ветров достигла максимальной величины, равной 50—65 *км/час*, и оставалась на таком уровне в течение двух — трех часов после взрыва; затем примерно через 6 часов эта скорость уменьшилась до величины, соответствующей слабому или умеренному ветру, и одновременно при этом изменилось и направление ветра. Ветер сопровождался перемежающимся дождем, небольшим над центром города и более сильным на расстоянии примерно от 1100 до 1500 *м* в северном и западном направлениях. Поскольку сильные потоки воздуха в приземном слое были направлены к центру пожара, огненный шторм оказался решающим фактором, ограничившим зону распространения пожара за пределы площади, первоначально охваченной огнем. Этим, собственно, и объясняется тот факт, что радиус выгоревшего в Хиросима района был во всех направлениях примерно одинаковым и не намного превышал тот радиус, в пределах которого появились пожары вскоре после взрыва. Однако при этом необходимо отметить, что в результате действия огненного шторма все возгораемые материалы, находившиеся в этом районе, были в конечном счете уничтожены огнем.

VII.101. Следует отметить, что огненный шторм отнюдь не является особенностью, характерной только для взрыва ядерной бомбы. Аналогичные огненные штормы имели место при больших лесных пожарах в США и особенно в Германии и Японии во время второй мировой войны после воздушных налетов, сопровождавшихся сбрасыванием зажигательных бомб. Сильный ветер, направленный к центру пожара, является результатом образования тяги над горящим районом. Эта тяга представляет собой направленные вверх потоки сильно нагретого воздуха и отличается от обычной тяги в дымовой трубе только гораздо бóльшей силой. Дождь, сопровождавший огненный шторм, очевидно, являлся

следствием конденсации влаги на твердых частицах, поднимавшихся из огня, при их попадании в область более холодного воздуха.

VII.102. Образование огненного шторма зависит от условий, существующих в данном районе во время возникновения пожара. Так, например, в Нагасаки огненного шторма не было, хотя спустя некоторое время после начала пожара скорость юго-западного ветра между холмами возросла до 55 *км/час*, причем ветер такой силы продолжал дуть в течение двух часов после взрыва. Примерно через 7 часов после взрыва направление ветра изменилось на восточное, а его скорость уменьшилась до 15—25 *км/час*. Такой характер ветров, несомненно, ограничивал распространение огня в тех направлениях, с которых эти ветры дули. Количество построек, оказавшихся в зоне огня в длинной узкой лощине, проходящей через Нагасаки, по-видимому, было недостаточным для возникновения огненного шторма. В Хиросима же, ввиду того что на ровной местности находилось много зданий, условия для образования огненного шторма оказались благоприятными.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ДЕЙСТВИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ[1]

Распределение энергии по спектру излучения, испускаемого огненным шаром

VII.103. Если предположить, что огненный шар, образующийся при ядерном взрыве, подобно Солнцу, ведет себя как абсолютно черное тело, т. е. как совершенный излучатель, то распределение энергии по спектру светового излучения в зависимости от температуры поверхности огненного шара может быть охарактеризовано с помощью известного уравнения Планка. Если через $E_\lambda d\lambda$ обозначить плотность энергии, то есть количество световой энергии, приходящейся на единицу объема в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, то

$$E_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \qquad \text{(VII.103.1)}$$

где c — скорость света;
h — постоянная Планка;
k — постоянная Больцмана, то есть газовая постоянная, отнесенная к одной молекуле;
T — абсолютная температура.

VII.104. На основе уравнения Планка можно определить плотность энергии светового излучения, испускаемого при ядерном взрыве, для всех длин волн при любой температуре. Результаты, полученные расчетным путем для нескольких значений температур,

[1] Этот раздел при чтении данной главы может быть опущен.

приведены на кривых, показанных на рис. VII.104. Из рисунка видно, что при температурах, превышающих примерно 8000° К, которые создаются в первом импульсе светового излучения (т. е. до достижения первого температурного минимума), большая часть световой энергии, испускаемой огненным шаром [1], приходится

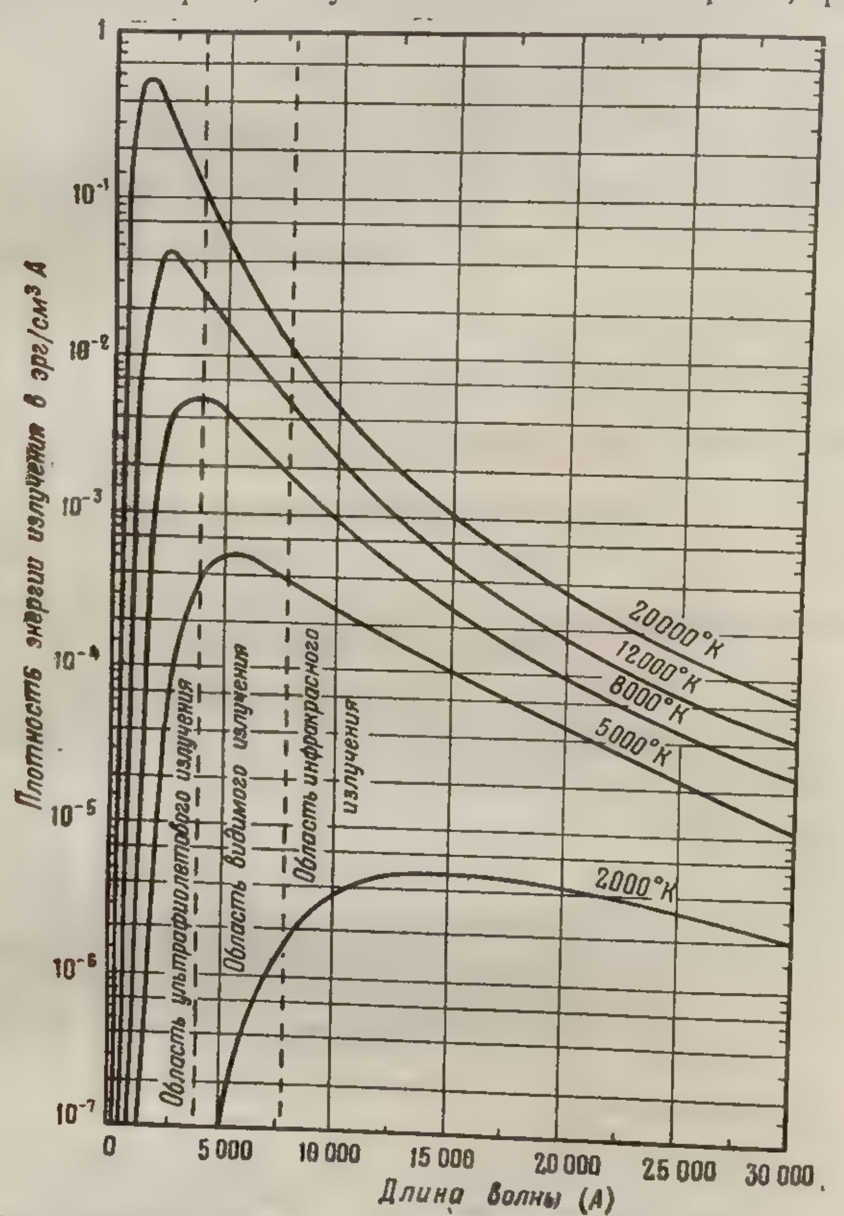


Рис. VII.104. Зависимость плотности энергии, приходящейся на единицу длины волны светового излучения, от длины волн этого излучения при различных температурах

---

[1] Общий световой импульс ядерного взрыва состоит из двух импульсов светового излучения. В первом импульсе количество световой энергии, испускаемое огненным шаром, составляет всего 1% от общего количества световой энергии, излучаемой за весь период существования огненного шара. (*Прим. перев.*)

на участок спектра с короткими длинами волн (ультрафиолетовых волн).

VII.105. Как видно из графика, приведенного на рис. VII.104, с уменьшением температуры абсолютно черного излучателя длина волны, при которой плотность энергии является максимальной, перемещается вправо, т. е. в область более длинных волн. Выражение для определения длины волны λ_m, которой соответствует максимальная плотность энергии, может быть получено путем дифференцирования уравнения (VII.103.1) по длине волны и приравнивания полученного результата к нулю. Тогда получаем

$$\lambda_m = \frac{A}{T}, \quad \text{(VII.105.1)}$$

где A — константа, равная 0,2897 ангстрем · град · К. Отсюда следует, что длина волны при максимальной плотности энергии является величиной, обратно пропорциональной абсолютной температуре.

VII.106. Зная величину A, можно рассчитать, что максимальная плотность энергии светового излучения приходится на видимую область спектра при температуре примерно 7600° К. Эта температура приближается к максимальной температуре поверхности огненного шара после прохождения минимума, то есть во время образования второго импульса светового излучения (рис. II.92). Поскольку температура не превышает 7600° К, а в среднем она даже меньше этой величины, очевидно, что большая часть лучистой энергии, испускаемой за время образования второго импульса, состоит из видимых и инфракрасных лучей и лишь очень небольшое количество лучей приходится на ультрафиолетовую область спектра.

Энергия светового излучения, испускаемого огненным шаром

VII.107. Для разрешения практических задач общая скорость испускания энергии светового излучения огненным шаром [1] имеет более важное значение, чем распределение плотности излучения по его спектру. Согласно закону Стефана — Больцмана поток (или интенсивность) лучистой энергии Φ, представляющий собой количество энергии, испускаемое в течение одной секунды с одного квадратного сантиметра поверхности абсолютно черного тела, связан с его абсолютной температурой T следующим уравнением:

$$\Phi = \sigma T^4, \quad \text{(VII.107.1)}$$

[1] Общая скорость испускания энергии светового излучения при ядерном взрыве представляет собой общее количество энергии светового излучения, испускаемое огненным шаром со всей его поверхности в единицу времени. (*Прим. перев.*).

где σ — постоянная величина. Величина Φ может быть также получена путем интегрирования уравнения Планка (VII.103.1) при постоянной температуре во всем диапазоне длин волн от 0 до бесконечности. Тогда будет найдено, что

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3c^2} = 1{,}38 \cdot 10^{-12} \frac{кал}{см^2 \cdot сек \cdot град^4 К}.$$

Определив значение σ, можно легко рассчитать величину общей интенсивности лучистой энергии, испускаемой огненным шаром при любой заданной температуре, при условии, что огненный шар ведет себя как абсолютно черное тело.

VII.108. Согласно уравнению (VII.107.1) интенсивность излучения, испускаемого огненным шаром, при любой температуре пропорциональна четвертой степени этой температуры в градусах Кельвина. Так как за время образования первого импульса светового излучения температура поверхности огненного шара является очень высокой, то и интенсивность испускания лучистой энергии, главным образом в ультрафиолетовой области спектра, также будет большой. Однако поскольку продолжительность первого импульса излучений мала, то и общее количество энергии, испускаемой огненным шаром за это время, будет также относительно небольшим. Во всяком случае, большая доля энергии светового излучения, испускаемая огненным шаром за время образования первого импульса, поглощается или рассеивается атмосферой до того, как это излучение пройдет значительное расстояние от огненного шара.

VII.109. Из определения потока (интенсивности) излучения, которое было дано в § VII.107, следует, что общая скорость испускания лучистой энергии огненным шаром может быть получена путем умножения величины интенсивности светового излучения, определяемой из уравнения (VII.107.1), на площадь огненного шара. Если R представляет собой радиус огненного шара, то величина его поверхности составляет $4\pi R^2$ и, следовательно, общая скорость испускания лучистой энергии будет равна $\sigma T^4 \cdot 4\pi R^2$. Эта величина представляет собой не что иное, как общую мощность светового излучения, поскольку мощность определяется как скорость образования (или расхода энергии). Если это произведение обозначить через P, то после подстановки значения σ получим

$$P = 4\pi\sigma T^4 R^2 = 1{,}71 \cdot 10^{-11} T^4 R^2 \text{ кал/сек},$$

где T — температура в градусах Кельвина;
R — радиус огненного шара в сантиметрах.

Если радиус R измеряется в метрах, то это выражение приобретает вид

$$P = 1{,}71 \cdot 10^{-7} T^4 R^2 \text{ кал/сек}. \quad \text{(VII.109.1)}$$

VII.110. Результаты многочисленных ядерных испытаний показывают, что огненный шар фактически не является абсолютно чер-

ным телом, т. е. ведет себя не как совершенный излучатель. Это объясняется рядом факторов. Прежде всего температура поверхности огненного шара во время первого импульса излучения непрерывно изменяется вследствие воздействия на него непосредственно окружающего воздуха; в последующее время температура огненного шара не определяется состоянием его поверхности, а является результатом влияния излучений, исходящих из внутренней части огненного шара. Радиус огненного шара за время образования второго импульса светового излучения определить очень трудно, так как поверхность светящегося огненного шара в этот период становится очень расплывчатой.

Поскольку радиус и температура поверхности огненного шара зависят от тротилового эквивалента, то для каждой мощности взрыва будет существовать различная зависимость между этими величинами. Однако, используя закон подобия, можно построить кривую, позволяющую производить для второго импульса излучения расчет количества световой энергии, испускаемой при различных тротиловых эквивалентах ядерного взрыва.

VII.111. Для взрыва ядерного заряда с любым тротиловым эквивалентом мощность светового излучения P является в действительности функцией времени. Однако вместо того, чтобы каждый раз строить график зависимости P от t, можно построить кривую зависимости между приведенной мощностью светового излучения, представляющей собой отношение $\frac{P}{P_{max}}$, и приведенным временем, которое выражается через отношение $\frac{t}{t_{max}}$, где P_{max} — величина максимальной мощности светового излучения, соответствующая температурному максимуму во втором импульсе излучения, а t_{max} — время, в течение которого этот максимум достигается. График зависимости $\frac{P}{P_{max}}$ от $\frac{t}{t_{max}}$ показан на рис. VII.111 (левая ордината). Этот график пригоден для любого ядерного взрыва независимо от его тротилового эквивалента.

VII.112. Для того чтобы кривая зависимости мощности светового излучения от времени стала пригодной для любого взрыва с заданным тротиловым эквивалентом, необходимо знать соответствующие величины P_{max} и t_{max}. Эти величины связаны с тротиловым эквивалентом взрыва W, выраженным в тыс. $т$, следующим образом:

$$P_{max} = 4W^{1/2} \frac{\text{тыс. } m}{сек}$$

и

$$t_{max} = 0{,}032 W^{1/2} \text{ сек.}$$

Применение этих уравнений показано ниже на примере.

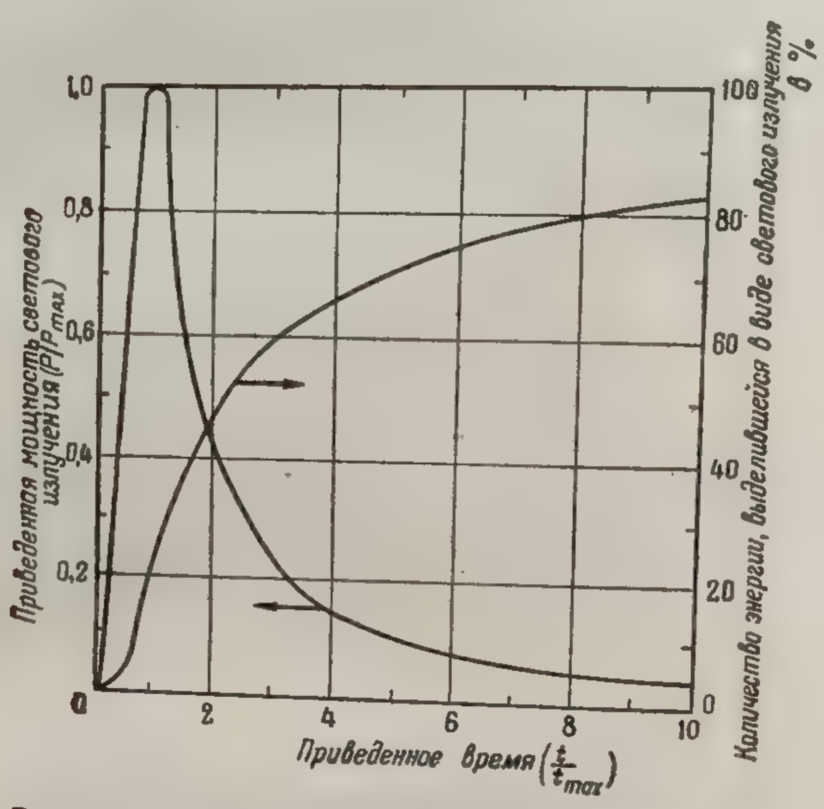


Рис. VII.111. Зависимость приведенной мощности светового излучения $\frac{P}{P_{\max}}$ и доли энергии, выделившейся в виде светового излучения $\frac{E}{E_{\text{общ}}}$, от приведенного времени $\frac{t}{t_{\max}}$ для второго импульса излучения

Кривые, показанные на рис. VII.111, выражают зависимость приведенной мощности светового излучения $\frac{P}{P_{max}}$ (левая ордината) и доли световой энергии, излученной огненным шаром к данному моменту времени, относительно общего количества световой энергии, испускаемой за все время существования огненного шара $\frac{E}{E_{общ}}$, выраженной в процентах (правая ордината), от приведенного времени $\frac{t}{t_{max}}$ (E представляет собой суммарное количество световой энергии, излученной огненным шаром к данному моменту времени t).

Метод расчета. Чтобы применить данные, получаемые из рис. VII.111, к взрыву, тротиловый эквивалент которого составляет W тыс. *т*, следует использовать следующие выражения:

$$P_{max} = 4W^{1/2}\,\frac{\text{тыс. } m}{сек};$$

$$t_{max} = 0{,}032W^{1/2}\ сек;$$

$$E_{общ} = \frac{1}{3}W\ \text{тыс. } m,$$

где t_{max} — время после взрыва, в течение которого достигается температурный максимум во втором импульсе светового излучения;

P_{max} — максимальная мощность (скорость) испускания световой энергии огненным шаром, наблюдающаяся в момент времени t_{max};

$E_{общ}$ — общее количество световой энергии, испускаемой огненным шаром за все время его существования.

Пример. Дано: тротиловый эквивалент ядерного взрыва — 500 тыс. *т*.

Определить: а) мощность (скорость) испускания световой энергии, б) количество энергии светового излучения, испускаемого огненным шаром через 2 секунды после взрыва.

Решение: Так как W равно 500 тыс. *т*, то величина $W^{1/2}$ составляет 22,4; тогда $t_{max} = 0{,}032 \times 22{,}4 = 0{,}72$ секунды, а приведенное время для 2 секунд после взрыва составит

$$\frac{t}{t_{max}} = \frac{2{,}0}{0{,}72} = 2{,}8.$$

а) Из рис. VII.111 по величине $\frac{t}{t_{max}} = 2{,}8$ находим, что значение $\frac{P}{P_{max}}$ составляет 0,26, а так как $P_{max} = 4 \times 22{,}4 = 90$ тыс. *т/сек*, то $P = 0{,}26 \times 90 = 23$ тыс. $т/сек = 23 \times 10^{12}$ *кал/сек*.

б) По величине приведенного времени, равной 2,8, из рис. VII.111 определяем, что величина $\frac{E}{E_{общ}} = 58\% = 0{,}58$, так как $E_{общ} = \frac{1 \times 500}{3} = 167$ тыс. *т*, следовательно, $E = 0{,}58 \times 167 = 97$ тыс. $т = 97 \times 10^{12}$ *кал*.

VII.113. Количество световой энергии E, испускаемое огненным шаром до определенного момента времени, можно определить путем измерения соответствующей площади под кривой зависимости P от t, ограниченной заданным временем. Результаты таких вычислений представлены в виде кривой зависимости $\frac{E}{E_{общ}}$ от $\frac{t}{t_{max}}$ — второй кривой на рис. VII.111 (правая ордината). Величина $E_{общ}$ представляет собой общую энергию светового излучения, испускаемую огненным шаром за все время излучения; эта величина связана с тротиловым эквивалентом W в тыс. $т$ следующим выражением:

$$E_{общ}(\text{тыс. } m) = \frac{1}{3} W. \qquad \text{(VII.113.1)}$$

Это соотношение получено на основе многих измерений, производившихся при ядерных испытаниях. Приведенное уравнение позволяет определить общее количество световой энергии, выраженное в тыс. $т$ тротилового эквивалента. В том случае, если количество световой энергии необходимо выразить в калориях, результат, получившийся из уравнения VII.113.1, следует умножить на 10^{12}.

VII.114. Кривые, показанные на рис. VII.111, имеют некоторые особенности, представляющие специальный интерес. Как и следовало ожидать, во втором импульсе излучения мощность светового излучения (или скорость испускания огненным шаром лучистой энергии) так же, как и температура, возрастает до максимума. Однако поскольку мощность светового излучения пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени, то из этого следует, что величина этой мощности увеличивается или уменьшается значительно быстрее, чем температура. Этим, собственно, и объясняется резкое повышение до максимума отношения $\frac{P}{P_{max}}$, которое можно наблюдать на графике, изображенном на рис. VII.111. После достижения максимального значения это отношение уменьшается менее резко. По мере охлаждения огненного шара кривая зависимости $\frac{P}{P_{max}}$ от времени становится все более плавной.

VII.115. С точки зрения защиты от действия светового излучения путем укрытия за преграду важной величиной является t_{max}, так как мощность светового излучения, испускаемого огненным шаром в этот момент, имеет максимальное значение. Из соотношения, приведенного в § VII.112, видно, что t_{max} возрастает пропорционально корню квадратному из тротилового эквивалента взрыва. Таким образом, для взрыва мощностью 10 тыс. $т$ t_{max} равно примерно 0,1 секунды, а для взрыва мощностью 10 млн. $т$ это время

превышает 3 секунды. Таким образом, на тех расстояниях от места взрыва, на которых могут образовываться серьезные ожоги кожи, попытка найти укрытие от действия светового излучения будет тем успешнее, чем большее значение будет иметь мощность взрыва.

Зависимость между количеством световой энергии и расстоянием

VII.116. Рассмотрим зависимость между общим количеством световой энергии (в *кал/см*²), падающей на объект, и расстоянием от этого объекта до центра взрыва. Как указывалось выше в данной главе, такая зависимость вместе с данными, содержащимися в таблицах VII.45, VII.61 и VII.65, дает возможность определить вероятные расстояния, на которых возможна та или иная степень поражения световым излучением.

VII.117. Если бы при распространении в атмосфере световое излучение не ослаблялось, общее количество световой энергии $E_{общ}$ на расстоянии D от центра взрыва распределялось бы равномерно

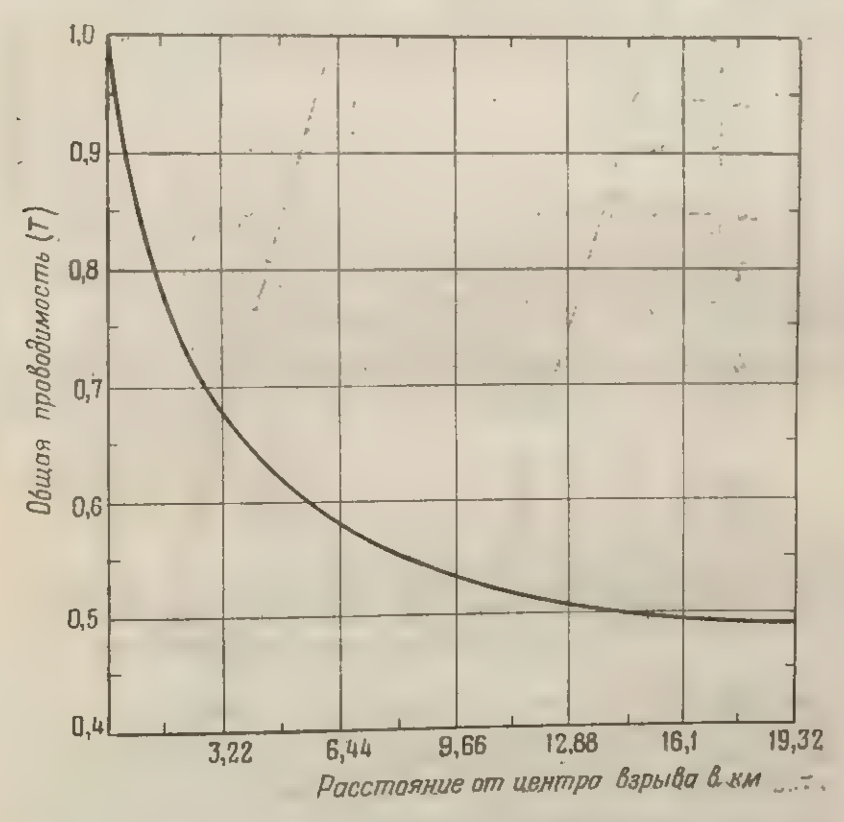


Рис. VII.118. Зависимость общей проводимости светового излучения, испускаемого абсолютно черным телом при температуре 6000° К от расстояния при дальности видимости 16 *км* и концентрации водяных паров в атмосфере 10 *г/м*³

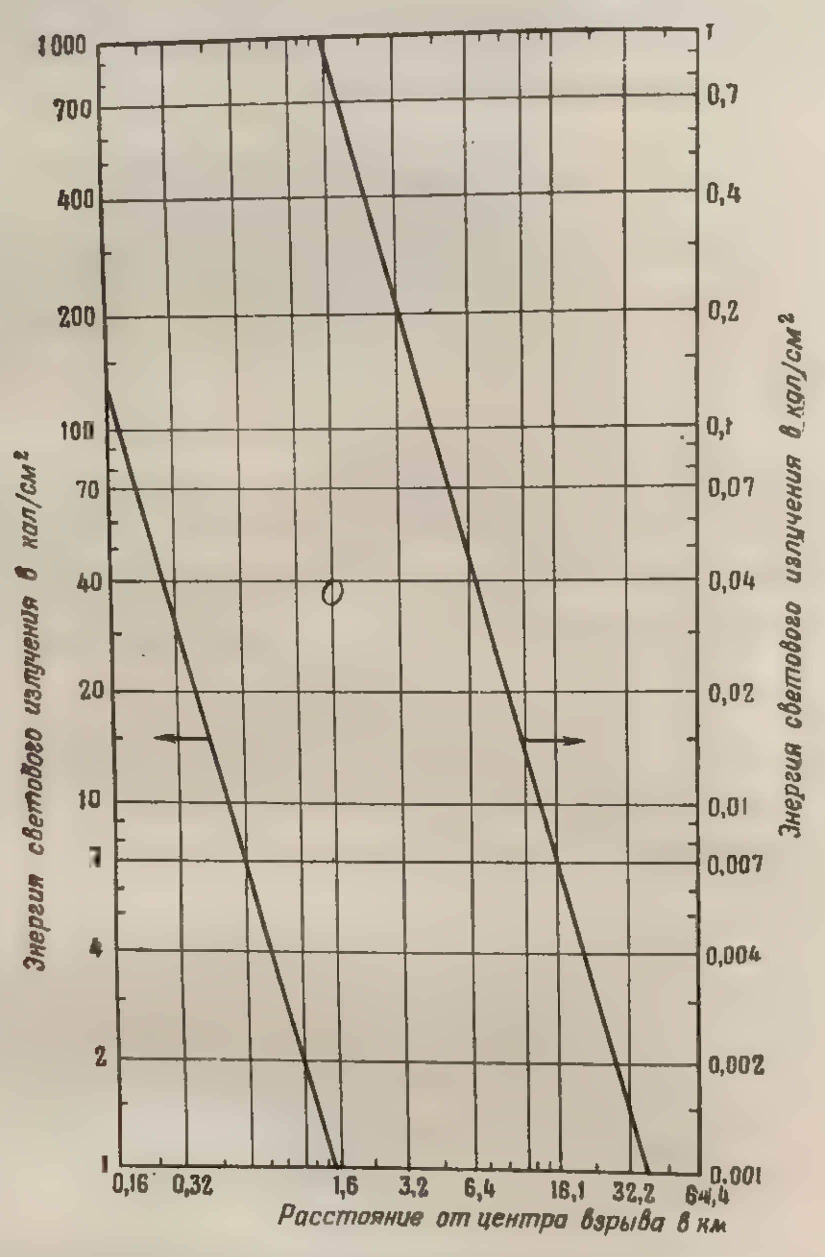


Рис. VII.119. Зависимость между количеством энергии светового излучения, падающей на единицу площади, и расстоянием от центра воздушного взрыва (для тротилового эквивалента 1 тыс. *т* и дальности видимости от 3 до 80 *км*)

График, изображенный на рис. VII.119, который для удобства его использования состоит из двух частей, показывает зависимость количества энергии светового излучения в *кал/см²*, получаемой объектами, от расстояний от центра воздушного взрыва для тротилового эквивалента 1 тыс. *т* и дальности видимости от 3 до 80 *км*.

Метод расчета. Количество световой энергии, полученной на любом заданном расстоянии от центра ядерного взрыва мощностью *W* тыс. *т*, в *W* раз больше количества световой энергии, полученной на том же расстоянии при взрыве ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*.

Пример. Дано: тротиловый эквивалент воздушного взрыва составляет 100 тыс. *т*; дальность видимости — 16 *км*.

Определить количество световой энергии, полученной на расстоянии 4,8 *км* от центра взрыва.

Решение: Из графика определяем, что количество световой энергии, полученной на расстоянии 4,8 *км* от центра взрыва мощностью 1 тыс. *т*, составляет 0,08 *кал/см²*. Следовательно, количество световой энергии, полученной на расстоянии 4,8 *км* от центра взрыва мощностью 100 тыс. *т*, составит $100 \times 0{,}08 = 8$ *кал/см²*.

по поверхности сферы, площадь которой составляет $4\pi D^2$. Если бы в атмосфере происходило ослабление излучения, обусловленное только поглощением, эту величину $E_{общ}$ необходимо было бы умножить на коэффициент e^{-kD}, где k представляет собой коэффициент поглощения, взятый в качестве средней величины для всех длин волн спектра излучения. При этих условиях количество световой энергии Q, получаемое единицей площади объекта на расстоянии D от центра взрыва, составляет

$$Q = \frac{E_{общ}}{4\pi D^2} e^{-kD}.$$

Согласно равенству VII.113 $E_{общ}$ составляет $\frac{1}{3}$ W 10^{12} *кал*, где W — тротиловый эквивалент в тыс *т*. Подставив вместо $E_{общ}$ его значение, приведенное выше, получим выражение

$$Q = \frac{10^{12} W e^{-kD}}{12\pi D^2} \text{ кал/см}^2,$$

где D — расстояние от центра взрыва в сантиметрах.

VII.118. Необходимо учитывать, что в атмосфере происходит не только поглощение излучения, но и его рассеяние, поэтому коэффициент k не является постоянной величиной, а представляет собой функцию расстояния; в этом случае учитывать ослабление светового излучения посредством экспоненциального множителя неудобно. Гораздо более удобным оказалось следующее выражение

$$Q = \frac{10^{12} WT}{12\pi D^2} \text{ кал/см}^2, \qquad \text{(VII.118.1)}$$

где T — проводимость, представляющая собой ту долю излучения, которая достигает расстояния D. Величина этой доли является сложной функцией дальности видимости (рассеяния), поглощения и расстояния. Кривая изменения величины T в зависимости от расстояния от центра взрыва показана на рис. VII.118. Эта кривая была построена для случая, когда дальность видимости составляет 16 *км*, а концентрация водяного пара в воздухе равна 10 *г/м*³. Расчеты для других возможных атмосферных условий дают результаты, которые не очень сильно отличаются от приведенных на рис. VII.118. Следовательно, во всех случаях без серьезной погрешности можно пользоваться одной и той же кривой проводимости (при условии, что расстояние от точки взрыва не больше половины дальности видимости).

VII.119. Для упрощения использования уравнения (VII.118.1) на рис. VII.119 представлен график зависимости между величиной Q

и расстоянием от центра взрыва D для тротилового эквивалента 1 тыс. $т$. Количество световой энергии, полученной объектом на любом расстоянии от центра взрыва, мощность которого по тротиловому эквиваленту равна W тыс. $т$, можно определить путем умножения количества световой энергии, определенной для данного расстояния из рис. VII.119, на значение W.

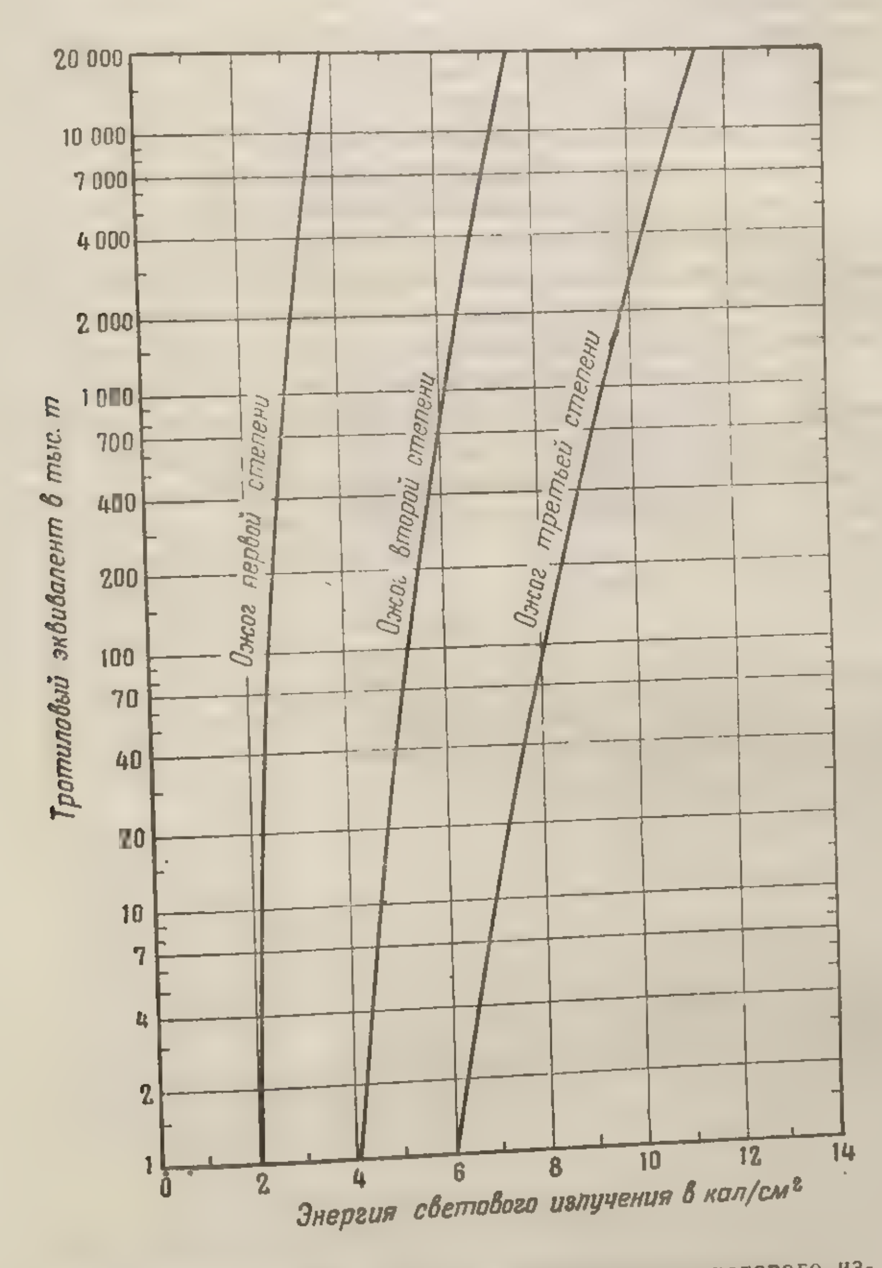


Рис. VII.120. Зависимость количества энергии светового излучения, вызывающего данную степень ожога, от тротилового эквивалента

Зависимость количества энергии, вызывающего световые ожоги, от тротилового эквивалента

VII.120. Так как с увеличением тротилового эквивалента величина t_{max} увеличивается, то отсюда следует, что данное количество энергии светового излучения при небольшой мощности взрыва будет получено в течение более короткого времени, чем при взрыве большой мощности. Следовательно, следует ожидать, что количество световой энергии, вызывающей ожоги той или иной степени, с увеличением тротилового эквивалента будет увеличиваться, о чем говорилось выше. На основе лабораторных исследований и наблюдений, произведенных во время ядерных испытаний, а также теоретических расчетов были определены количества энергии светового излучения, вызывающие средние ожоги первой, второй и третьей степени в зависимости от тротилового эквивалента. Полученные результаты приведены в виде графика на рис. VII.120.

VII.121. Использование сочетания данных графика, изображенного на рис. VII.120, и зависимостей между количеством световой энергии и расстоянием от центра взрыва (при данном тротиловом эквиваленте) дало возможность построить график, изображенный на рис. VII.47. В примере к рис. VII.119 было определено, что на расстоянии 4,8 километра от места воздушного взрыва мощностью 100 тыс. *т* количество полученной объектом световой энергии составляет 8 *кал/см*². Из рис. VII.120 видно, что такое количество световой энергии при ядерном взрыве мощностью 100 тыс. *т*, по-видимому, приведет к образованию ожогов третьей степени.

ГЛАВА VIII

НАЧАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ РАДИАЦИЯ

ПРИРОДА ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Нейтроны и гамма-лучи

VIII.1. Как отмечалось в гл. I, одна из характерных особенностей ядерного взрыва заключается в том, что он сопровождается испусканием ядерной радиации. По своей природе ядерная радиация совершенно не похожа на световое излучение, рассмотренное в предыдущей главе. Эта радиация представляет собой поток гамма-лучей, нейтронов, бета-частиц и небольшого количества альфа-частиц. Преобладающая часть нейтронов и некоторая часть гамма-лучей испускаются в процессе деления, т. е. в момент взрыва, тогда как бета-частицы и остальная часть гамма-лучей освобождаются по мере радиоактивного распада продуктов деления. Некоторое количество альфа-частиц образуется при реакциях соединения ядер тяжелого водорода (§ I.55), а другая часть альфа-частиц испускается при обычном радиоактивном распаде ядер урана или плутония, которые не успели прореагировать во время взрыва.

VIII.2. В связи с особым характером явлений, сопровождающих ядерный взрыв в воздухе или вблизи поверхности земли (воды), для практических целей удобно разделить ядерную радиацию на две категории, а именно на начальную и остаточную (см. § I.2). Разграничение этих видов радиации во времени является несколько произвольным, однако продолжительность начальной радиации с момента взрыва может быть принята равной примерно одной минуте (см. § II.39). Для подземного или подводного взрыва разделение радиации на начальную и остаточную не имеет большого значения (см. § II.64, II.74), однако и для этих видов взрывов такое разграничение возможно.

VIII.3. Длина пути пробега альфа- и бета-частиц сравнительно мала, вследствие чего эти частицы при воздушном взрыве не могут достигать наземных объектов. Даже в том случае, когда огненный шар касается поверхности земли, альфа- и бета-частицы не играют большой роли. Таким образом, можно считать, что на-

чальная ядерная радиация состоит только из гамма-лучей и нейтронов, образующихся в течение первой минуты после ядерного взрыва. Оба эти вида излучений различаются по своему характеру, однако общим для них является то, что они могут проникать через воздух на значительные расстояния. Кроме этого, как гамма-лучи, так и нейтроны могут оказывать вредное воздействие на живые организмы (см. гл. XI). Именно чрезвычайно вредный характер этих ядерных излучений, а также их большая проникающая способность делают их очень важным поражающим фактором ядерных взрывов.

VIII.4. Большая часть гамма-лучей, выделяющихся в процессе деления, поглощается материалами, из которых изготовлена бомба, и, как следствие, эта часть гамма-лучей превращается в другие формы энергии. По этой причине лишь небольшая часть (около 1%) образовавшихся в процессе деления гамма-лучей проникает на значительное расстояние от места ядерного взрыва. Однако, как будет показано ниже, имеется несколько других источников гамма-излучений, которые образуют определенную долю начальной ядерной радиации. Точно так же движение нейтронов, образующихся при делении, в значительной мере замедляется; эти нейтроны захватываются остатками взорвавшейся бомбы или поглощаются воздухом, увлекаемым фронтом ударной волны. Тем не менее достаточно большое количество быстрых нейтронов деления вырывается из зоны взрыва и создает серьезный поражающий фактор на больших расстояниях от центра взрыва. Хотя энергия начальных гамма-лучей и нейтронов составляет только около 3% общей энергии, освобождающейся при взрыве (на долю светового излучения приходится примерно 33% общей энергии взрыва), начальная ядерная радиация может явиться причиной значительной части поражений, вызываемых взрывом ядерной бомбы.

Сравнение излучений, образующихся при взрыве ядерной бомбы

VIII.5. Как показано в главе VII, защита от светового излучения на средних расстояниях от центра взрыва ядерной бомбы является довольно простым делом, чего нельзя сказать о защите от действия гамма-лучей и нейтронов. Например, на расстоянии, равном 1,6 *км* от места взрыва ядерной бомбы с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, начальная ядерная радиация, вероятно, окажет смертельное действие примерно на 50% людей даже в случае, если они защищены слоем бетона толщиной 60 *см*; на таком же расстоянии полная защита от светового излучения может быть обеспечена слоем бетона значительно меньшей толщины. Таким образом, проблемы, связанные с защитой от светового излучения и ядерной радиации, являются совершенно различными.

VIII.6. Зоны эффективного поражения световым излучением и ядерной радиацией могут сильно отличаться одна от другой. При

взрывах средней и большой мощности световое излучение может оказывать поражающее действие на значительно бо́льших расстояниях, чем начальная ядерная радиация. Например, на расстояниях, превышающих 2 *км*, начальная ядерная радиация, испускаемая при взрыве мощностью 20 тыс. *т*, не окажет существенного поражающего действия даже при отсутствии защиты. Однако воздействие светового излучения на этом расстоянии может вызвать серьезные ожоги кожи. С другой стороны, при небольшой мощности ядерного взрыва, например 1 тыс. *т* или менее, радиус поражающего действия начальной радиации будет больше, чем для светового излучения.

VIII.7. При изучении характеристик начальной ядерной радиации целесообразно рассматривать нейтроны и гамма-лучи отдельно. Хотя в конечном счете результаты их действия на живые организмы в основном одинаковы, эти два вида ядерной радиации во многих отношениях отличаются друг от друга. В следующем разделе будут рассматриваться гамма-лучи, далее в этой же главе будут рассмотрены нейтроны.

ГАММА-ЛУЧИ

Источники гамма-лучей

VIII.8. Кроме потока гамма-лучей, образующихся непосредственно в процессе деления ядер, начальная ядерная радиация включает в себя поток гамма-лучей, испускаемых другими источниками. Часть нейтронов, образующихся при делении, расходуется на поддержание цепной реакции деления, другая небольшая часть нейтронов вырывается из зоны взрыва в окружающую среду; однако наибольшая доля нейтронов деления неизбежно захватывается неделящимися ядрами. В результате захвата нейтрона ядром образуется новое промежуточное ядро, известное под названием «составное ядро», которое находится в возбужденном состоянии (т. е. обладает избытком энергии). Избыток энергии может затем почти мгновенно выделиться в виде гамма-лучей. Эти лучи называются **гамма-лучами захвата,** так как они образуются в результате захвата нейтрона ядром. Соответственно и сам процесс называют **радиационным захватом.**

VIII.9. Нейтроны, образующиеся при делении, могут вступить в реакцию радиационного захвата как с ядрами различных веществ, входящих в состав бомбы, так и с ядрами азота, находящегося в окружающей атмосфере. Эти реакции сопровождаются испусканием гамма-лучей, которые составляют часть начальной ядерной радиации. Взаимодействие с ядрами азота имеет особенно большое значение, так как некоторая часть гамма-лучей, образующихся при этом взаимодействии, обладает очень большой энер-

гией и, следовательно, ослабляется окружающей средой значительно меньше, чем другие составные части начального гамма-излучения.

VIII.10. Взаимодействие нейтронов деления с ядрами атомов приводит к образованию еще одного источника гамма-лучей. Когда быстрый нейтрон, т. е. нейтрон, обладающий большой кинетической энергией, сталкивается с ядром, он может передать этому ядру часть своей энергии и привести его в возбужденное состояние. Возбужденные ядра могут затем путем испускания гамма-лучей восстановить свое нормальное (исходное) энергетическое состояние.

VIII.11. Гамма-лучи, образующиеся при делении, а также в результате других нейтронных реакций и возбуждения ядер атомов веществ, входящих в состав бомбы, испускаются в течение одной секунды (или меньше) после ядерного взрыва. Вследствие этого гамма-лучи, испускаемые этими источниками, называются **быстрыми**, или **мгновенными**, гамма-лучами.

VIII.12. Осколки деления и многие продукты их распада представляют собой радиоактивные изотопы, которые испускают гамма-лучи (см. гл. I). Периоды полураспада этих радиоактивных изотопов колеблются от миллионных долей секунды (и меньше) до многих лет. Тем не менее поскольку радиоактивный распад осколков деления начинается в момент взрыва и поскольку скорость их распада является наибольшей в начале процесса распада, то и интенсивность гамма-излучения, испускаемого этими радиоактивными изотопами в течение первой минуты после взрыва, будет заметно больше. Другими словами, гамма-лучи, испускаемые продуктами деления, составляют значительную часть начальной ядерной радиации. Однако поскольку процесс радиоактивного распада является продолжительным (и постепенным) и охватывает довольно большой период времени по сравнению с временем, в течение которого образуется мгновенная радиация, гамма-лучи, испускаемые продуктами деления, называются **запаздывающими**.

VIII.13. Мгновенные гамма-лучи и часть запаздывающего гамма-излучения, которые являются составными частями начальной радиации, почти равны по количеству, но отнюдь не являются равными долями начального ядерного излучения, распространяющегося от места взрыва ядерной бомбы. Мгновенные гамма-лучи образуются почти полностью до момента полного разрушения бомбы. Поэтому мгновенные гамма-лучи сильно поглощаются материалами, из которых изготовлена бомба, и только небольшая доля этих лучей прорывается наружу. С другой стороны, запаздывающие гамма-лучи испускаются в основном на последней стадии взрыва, после того как материалы бомбы успевают испариться и расшириться в пространстве, образуя разреженный газ. Таким образом, эти лучи поглощаются очень мало или совсем не погло-

щаются. Конечный результат состоит в том, что в течение первой минуты после воздушного (или наземного) взрыва количество запаздывающих гамма-лучей вместе с лучами, которые образуются на данном расстоянии в результате радиационного захвата нейтронов атмосферным азотом, оказывается примерно в 100 раз больше количества мгновенных гамма-лучей, достигающих этого же расстояния.

VIII.14. Имеется еще один возможный источник гамма-лучей, о котором можно сказать несколько слов. Если ядерный взрыв происходит вблизи поверхности земли, то образующиеся при взрыве нейтроны могут создавать так называемую **наведенную радиоактивность** в веществах, входящих в состав грунта. Этот процесс может сопровождаться излучениями, которые будут представлять собой часть запаздывающих гамма-лучей. Поскольку наведенная радиоактивность относится к остаточной радиации, она будет рассмотрена более детально в следующей главе.

Измерение гамма-излучения

VIII.15. Световое излучение ядерного взрыва можно ощущать в виде тепла, часть же этого излучения, приходящуюся на видимую область спектра, можно наблюдать органами зрения. Однако органы чувств человека не реагируют на ядерную радиацию, за исключением тех случаев, когда излучение имеет чрезвычайно большую интенсивность (мощность дозы чрезвычайно велика); в таких случаях на коже ощущается покалывание и зуд. Поэтому для обнаружения и измерения различных ядерных излучений были разработаны специальные методы и приборы, основанные на взаимодействии этих излучений с веществами окружающей среды.

VIII.16. При прохождении гамма-лучей через какое-нибудь вещество, которое может быть в любом состоянии (твердом, жидком или газообразном), происходит взаимодействие этих лучей с атомами вещества, протекающее различными способами. С точки зрения измерения величины дозы гамма-излучения важное значение имеют два основных следствия, являющиеся результатом этих взаимодействий. Первое следствие состоит в том, что из многих атомов выбиваются электроны. Поскольку электрон несет отрицательный электрический заряд, оставшаяся часть атома оказывается заряженной положительно, т. е. представляет собой положительный ион. Этот процесс называют **ионизацией**, а образующиеся при этом электроны и положительные ионы называют **ионными парами.**

VIII.17. Второе следствие заключается в том, что при взаимодействии гамма-лучей с атомами некоторых твердых, жидких и газообразных веществ электрон не удаляется полностью из атома, как при ионизации, а приобретает дополнительное количество

энергии. В результате этот атом переходит в возбужденное состояние. Это явление называется **возбуждением.**

VIII.18. Явления ионизации и возбуждения используются для обнаружения и измерения как гамма-излучения, так и других ядерных излучений. В нормальном состоянии газ не проводит электрического тока в сколько-нибудь заметной степени, но при прохождении через него ядерных излучений в результате образования ионных пар газ становится довольно хорошим проводником электрического тока. Некоторые типы приборов, такие, например, как счетчик Гейгера и карманная камера (или дозиметр), предназначенные для измерения гамма- (и других) излучений, основываются на принципе образования в газе электрически заряженных пар ионов и их способности проводить электрический ток.

VIII.19. С другой стороны, действие сцинтилляционных счетчиков основано на использовании процесса возбуждения. Когда атом или молекула переходят в возбужденное состояние, они, как правило, отдают избыток своей энергии в течение примерно одной миллионной доли секунды. Некоторые вещества, обычно находящиеся в твердом или жидком состоянии, способны терять избыток своей энергии электронного возбуждения в форме видимых вспышек света (или сцинтилляций). Эти вспышки можно зарегистрировать с помощью фотоумножителя, соединенного с соответствующим электронным устройством.

VIII.20. Помимо отмеченных прямых последствий ионизации и возбуждения, могут иметь место некоторые косвенные последствия этих явлений, главным образом в виде химических изменений. Примером может служить потемнение фотопленки, обнаруживаемое после ее проявления. Пленочные индикаторы ядерных излучений обычно содержат 2 или 3 образца фотопленки, подобных тем, которые используются зубными врачами при производстве рентгеновских снимков. Эти пленки завернуты в бумагу (или в какой-нибудь другой тонкий материал), не пропускающую световых излучений, но через которую легко проникают гамма-лучи. Пленки после их облучения проявляются; степень потемнения этих пленок является мерой количества поглощенных гамма-лучей. Кроме того, в стадии разработки находятся самопоказывающие химические дозиметры. При помощи этих дозиметров количество поглощенного ядерного излучения можно определять непосредственно по изменению цвета, которое вызывается определенными химическими реакциями, протекающими под воздействием ядерной радиации.

Единицы измерения радиации. Рентген

VIII.21. Чтобы измерить количество гамма-излучения в любой заданной точке, необходимо иметь соответствующую единицу измерения. Единица, используемая для этой цели, называется **рентгеном** (*р*). Достоинство этой единицы заключается в том, что ве-

личина полученной дозы, выраженная в рентгенах, может быть использована для оценки ожидаемого биологического эффекта (или поражения), обусловленного радиацией.

VIII.22. Обычно полагают, что вредное воздействие ядерных излучений на живой организм является в основном следствием химического разложения молекул, находящихся в животных (или растительных) клетках. Причиной химического разложения молекул является главным образом ионизация (или возбуждение), происходящая при воздействии ядерных излучений. Степень ионизации или количество пар ионов, образовавшихся под воздействием радиации, служит, таким образом, фактором, подлежащим измерению. Так как полное определение рентгена является несколько сложным, то для упрощения можно сказать, что рентгеном называется такое количество гамма-излучений (или рентгеновских лучей), которое, будучи поглощенным одним граммом воздуха, создает в нем $1{,}61 \times 10^{12}$ пар ионов. Поглощение 1 *р* гамма-излучений одним граммом воздуха сопровождается выделением примерно 87 эргов (*э*) энергии.

VIII.23. Приборы, предназначенные для дозиметрических измерений, количество рентгенов непосредственно не фиксируют. Однако посредством соответствующих приспособлений можно регистрировать, например, количество электрических импульсов, сцинтилляций или степень потемнения фотопленки и осуществлять таким образом практическое измерение интенсивности и количества поглощенного излучения, выраженных в рентгенах. Для этого разнообразные дозиметрические приборы калибруются при помощи стандартного источника гамма-лучей. Для этой цели обычно используется известное количество радиоактивного кобальта или радия. Количество гамма-излучения в рентгенах, поглощенного воздухом на определенном расстоянии от источника, определяется по результатам измерений, проводимых при помощи специальной лабораторной аппаратуры, которая обычно является неудобной для широкого применения в полевых условиях.

VIII.24. При помощи дозиметрической аппаратуры можно осуществлять два типа измерений, имеющих важное практическое значение. Некоторые из дозиметрических приборов фиксируют суммарную дозу (или количество) излучения в рентгенах, получаемую в течение всего периода воздействия. Другие приборы указывают мощность дозы в рентгенах в час или для случая небольших мощностей доз в миллирентгенах в час; миллирентген представляет собой одну тысячную долю рентгена. Суммарная доза излучения равна величине усредненной во времени мощности дозы, умноженной на время воздействия излучения.

VIII.25. Хотя при помощи некоторых дозиметрических приборов можно измерять как суммарную дозу излучения, так и мощность дозы, однако большинство этих приборов предназначается

для измерения лишь одной из указанных характеристик. Наиболее важной характеристикой начальной радиации является суммарная доза; что касается остаточной ядерной радиации, которой посвящена глава IX, то важными характеристиками этой радиации являются как мощность дозы, так и суммарная доза.

VIII.26. Биологическое воздействие различных доз гамма-излучения будет рассмотрено более полно в главе XI. Однако, чтобы дать некоторое представление о значении величин суммарных доз излучения, полученных человеком (которые приводятся ниже), можно сказать, что однократная доза менее 25 *р* не вызывает заметных клинических последствий. Дозы, превосходящие указанную величину, по мере их возрастания оказывают все более серьезное воздействие и при общем облучении всего организма в течение примерно месяца суммарной дозой, равной 450 *р*, смерть наступает приблизительно у 50% облученных людей. При облучении всего организма суммарной дозой в 700 и более рентген смертельный исход будет, вероятно, почти во всех случаях.

VIII.27. В предыдущем параграфе при рассмотрении поражающих доз предполагалось, что имеет место общее облучение организма. В этом отношении ядерная радиация и световое излучение очень схожи. Ожог третьей степени на ограниченном участке кожи может вызвать лишь незначительные последствия, тогда как ожог второй степени на большей части тела может быть смертельным. Точно так же доза ядерной радиации в 1000 *р* и более, полученная на небольшом участке тела, будет причинять местное поражение, которое, по всей вероятности, не окажет заметного влияния на весь организм. Если же все тело или бо́льшая его часть подвергнется облучению радиацией такой же дозы, то результатом, несомненно, явится смерть.

Поглощенная доза радиации (*рад*) и биологический рентген-эквивалент (*брэ*)

VIII.28. Рентген как единица дозы излучения используется для гамма- (или рентгеновских) лучей и применяется, строго говоря, для измерения только этих излучений. Кроме того, рентген в конечном результате представляет собой скорее меру интенсивности радиации в данной точке пространства, чем количество излучения, поглощенное человеком, находящимся в данном месте. Таким образом, доза, выраженная в рентгенах, представляет собой величину **действующей дозы**. Для того чтобы отличить эту дозу от **поглощенной дозы**, требуется другая единица. Одной из таких единиц является «физический рентген-эквивалент» (*фрэ*).

VIII.29. В § VIII.22 было указано, что доза гамма-излучения, равная 1 *р*, эквивалентна поглощению одним граммом воздуха энергии, равной приблизительно 87 *э*. Единица *фрэ* поэтому перво-

начально определялась как доза любого ядерного излучения (гамма-лучей, бета-частиц, нейтронов и т. д.), сопровождающаяся поглощением одним граммом животной ткани указанного количества энергии (87 *э*). Однако позже было установлено, что облучение дозой гамма-излучения, равной 1 *р*, сопровождается поглощением одним граммом мягкой ткани энергии, количество которой составляет примерно 97 *э*. Единицей измерения *фрэ* стали после этого пользоваться для обозначения такой дозы любого ядерного излучения, поглощение которой одним граммом ткани сопровождается освобождением 97 *э* энергии.

VIII.30. Приведенное выше определение *фрэ*, основанное на понятии «рентгена», является малоудовлетворительным, так как в конечном счете количество эргов определяется величиной энергии, необходимой для образования одной пары ионов в воздухе. Эта величина энергии с достаточной точностью не известна, и по мере накопления новых экспериментальных данных количество эргов, которым определяется единица *фрэ*, постоянно меняется. Чтобы избежать этого затруднения, была введена новая единица поглощенной дозы радиации (*рад*), которая не страдает таким недостатком.

Эта единица представляет собой такую дозу любого ядерного излучения, поглощение которой одним граммом облучаемого материала сопровождается выделением энергии, равной 100 *э*. энергии. Для мягкой ткани различие между *фрэ* и *рад* незначительно, и численные значения поглощенной дозы, выраженные в *фрэ*, существенно не меняются при измерении ее в единицах *рад*.

VIII.31. Хотя все ионизирующие излучения вызывают аналогичные биологические последствия, однако величина поглощенной дозы, измеренная в *рад*, которая производит определенный эффект, может значительно изменяться в зависимости от вида излучения. В этой связи различие в эффективности биологического действия разных видов излучения принято выражать с помощью величины, называемой **относительной биологической эффективностью** (*обэ*) данного вида ядерного излучения. Относительная биологическая эффективность данного вида излучения определяется отношением поглощенной дозы (выраженной в *рад*) гамма-излучения, обладающего определенным значением энергии фотонов, к дозе данного излучения, измеренной также в *рад* и оказывающей такое же самое биологическое воздействие.

VIII.32. Величина относительной биологической эффективности данного вида ядерного излучения зависит от нескольких факторов, а именно от энергии излучения, вида и степени биологического поражения, а также от особенностей облучаемого организма или ткани. Что касается ядерного оружия, то важнейшим критерием эффективности применения этого оружия является лучевая болезнь, выводящая из строя живую силу, или смерть. Поэтому величина относительной биологической эффективности оценивается

с точки зрения именно этих двух последствий, являющихся результатом действия ядерных излучений, испускаемых при ядерном взрыве.

VIII.33. Имея представление о величине относительной биологической эффективности, мы можем ввести еще одну единицу измерения, называемую **биологическим рентген-эквивалентом** (*брэ*). Единица *рад* удобна для измерения количества поглощенной энергии, однако эта единица не учитывает биологического воздействия данного вида ядерного излучения, поглощенного организмом. Доза, выраженная через биологический рентген-эквивалент, определяется следующим равенством:

доза, выраженная в *брэ* = *обэ* × *рад*. Эта доза определяет степень биологического поражения, являющегося результатом поглощения данного вида ядерного излучения. Таким образом, *брэ* представляет собой единицу измерения биологической дозы, в то время как *рад* является единицей измерения поглощенной дозы, а рентген — единицей измерения действующей в данный момент дозы облучения. Согласно определению, приведенному в § VIII.31, *обэ* для гамма-лучей равна приблизительно единице, хотя ее величина несколько и изменяется в зависимости от энергии излучения. Следовательно, для гамма-излучения биологическая доза, выраженная в *брэ*, численно равна поглощенной дозе, измеренной в *рад*, а так как значения *рад* и *фрэ* для мягкой ткани близки, то биологическая доза также приблизительно равна дозе воздействующего излучения, измеренной в рентгенах.

Разумеется, это равенство не является справедливым по отношению к другим ядерным излучениям.

Зависимость между дозой гамма-излучения и расстоянием

VIII.34. Доза воздействующего гамма-излучения в данной точке пространства будет тем меньше, чем больше расстояние от этой точки до места ядерного взрыва. Зависимость дозы излучения от расстояния определяется двумя факторами, аналогичными тем, которые применимы к световому излучению. Во-первых, по мере того как излучение распространяется от места взрыва бомбы, происходит обычное уменьшение интенсивности излучения вследствие его распределения на все бо́льшей и бо́льшей площади. Уменьшение интенсивности излучения в данной точке пространства, обусловленное этой причиной, обратно пропорционально квадрату расстояния от этой точки до центра взрыва. Кроме того, ослабление интенсивности радиации происходит вследствие поглощения и рассеяния гамма-лучей окружающей атмосферой.

VIII.35. Измерения доз гамма-излучения на определенных расстояниях для различных тротиловых эквивалентов ядерного заряда производились при проведении многих испытательных взрывов. Полученные результаты оказались совпадающими. Эти результаты

можно представить в виде двух графиков; первый из этих графиков (рис. VIII.35а) показывает зависимость между дозой начального гамма-излучения и расстоянием от данной точки до центра взрыва для тротилового эквивалента, равного 1 тыс. *т*. На втором графике (рис. VIII.35б) приводятся значения коэффициента пересчета, которыми следует пользоваться для определения величины дозы на том же самом расстоянии от места взрыва при любой мощности ядерного заряда (вплоть до 20 млн. *т*).

VIII.36. Метод использования графиков, изображенных на рис. VIII.35а и VIII.35б, показывается ниже на примере определения величины дозы начального гамма-излучения, полученной на расстоянии 1,6 *км* от центра воздушного взрыва мощностью 100 тыс. *т*. Из рис. VIII.35а следует, что воздействующая доза гамма-излучения на указанном расстоянии от центра воздушного взрыва мощностью в 1 тыс. *т* составляет 2,5 *р*. Коэффициент пересчета, определяемый из рис. VIII.35б для тротилового эквивалента 100 тыс. *т*, равен 150. Следовательно, в данном случае доза начального гамма-излучения составляет $2{,}5 \times 150 = 375$ *р*.

VIII.37. Численные значения доз, приведенные на графике (рис. VIII.35а), в известной мере зависят от плотности воздуха, находящегося между центром взрыва и точкой на поверхности земли, в которой определяется доза радиации. Это объясняется тем, что в процессе своего распространения некоторая часть гамма-излучения поглощается воздухом, причем более плотный воздух вблизи поверхности земли поглощает больше излучений, чем менее плотный воздух в верхних слоях атмосферы. Данные, приведенные на графике, относятся к нормальной плотности воздуха на уровне моря.

VIII.38. Из рис. VIII.35б видно, что величина коэффициента пересчета растет относительно быстрее, чем тротиловый эквивалент; другими словами, в диапазоне больших тротиловых эквивалентов ядерного заряда коэффициент пересчета увеличивается быстрее, чем в диапазоне малых тротиловых эквивалентов. Например, для тротилового эквивалента в 100 тыс. *т* коэффициент пересчета составляет примерно 150, а для тротилового эквивалента в 1 млн. *т* этот коэффициент несколько больше 5000. Такое увеличение коэффициента пересчета вызвано уменьшающейся с возрастанием мощности взрыва плотностью воздуха в фазе разрежения, наступающей после фазы сжатия воздушной ударной волны (§ III.5). По этой причине гамма-лучи, испускаемые продуктами деления (запаздывающие гамма-лучи), ослабляются меньше. Для слабых взрывов, тротиловый эквивалент которых составляет 100 тыс. *т* и меньше, как излучения, испускаемые продуктами деления, так и гамма-лучи с высокой энергией, образующиеся в процессе радиационного захвата нейтронов ядрами атомов азота, содержащегося в воздухе, обусловливают увеличение коэффициента пересчета.

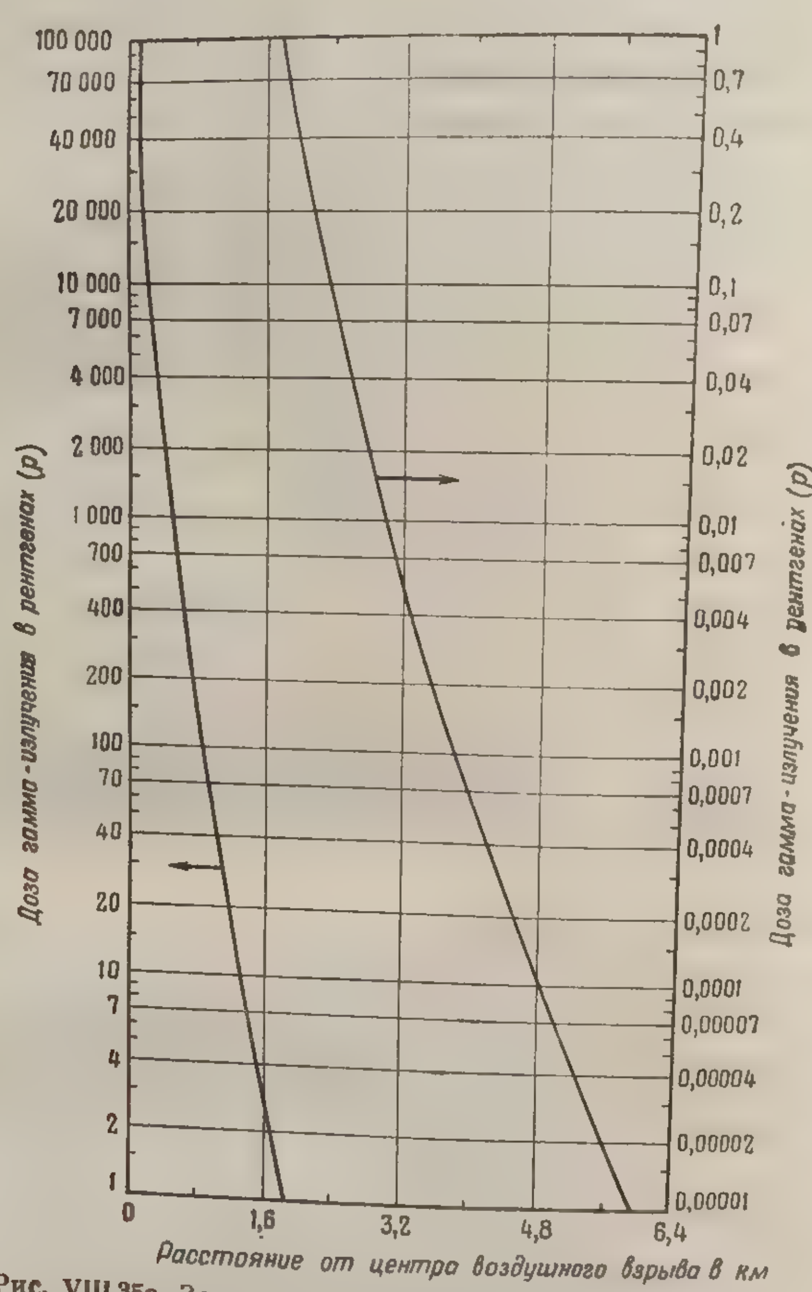


Рис. VIII.35а. Зависимость дозы начального гамма-излучения от расстояния при воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

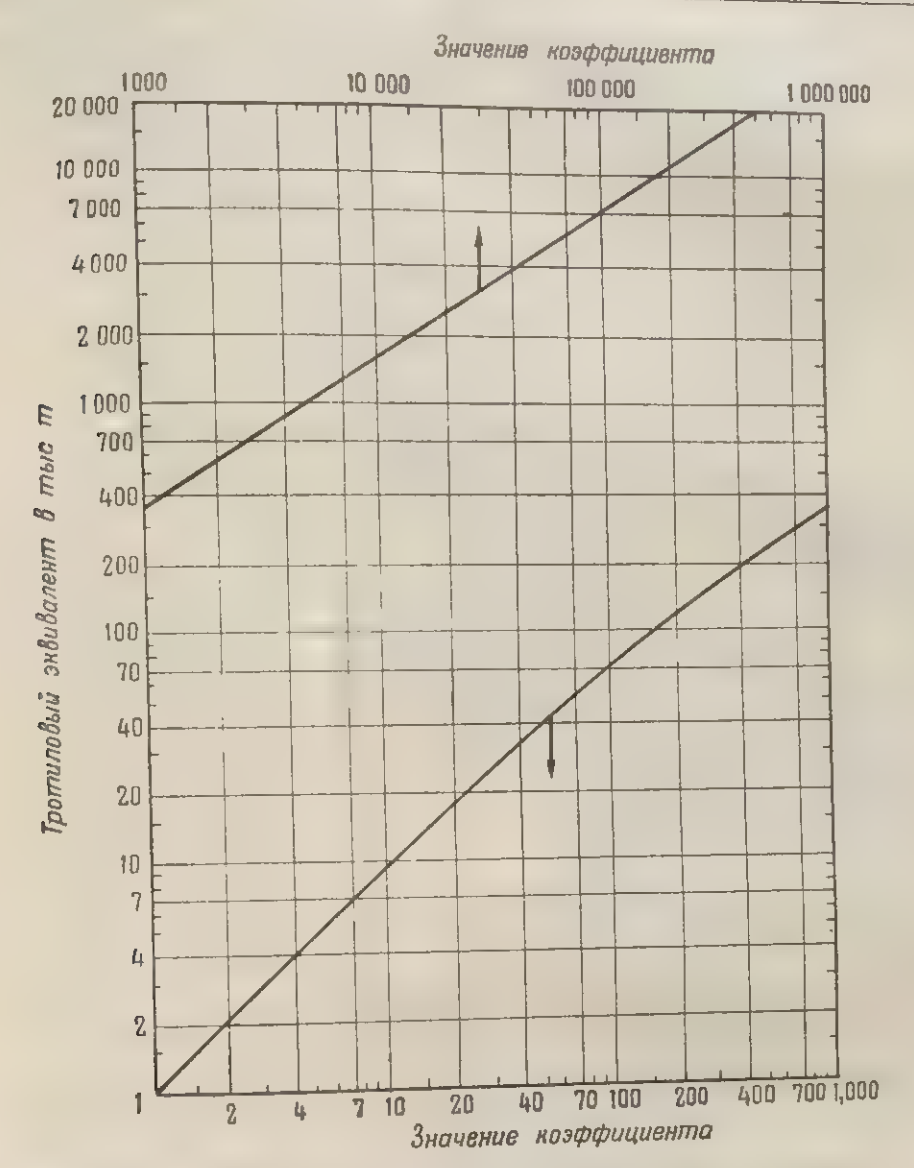
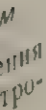


Рис. VIII.35б. Изменение значения коэффициента пересчета, используемого для определения величины дозы начального гамма-излучения, в зависимости от тротилового эквивалента

VIII.39. Зависимость доз начального гамма-излучения от тротилового эквивалента может быть выражена в другой форме, которая представлена на рис. VIII.39. Расстояния от центра воздушного взрыва мощностью от 1 тыс. *т* до 20 млн. *т*, на которых будут образовываться данные величины доз начального гамма-излучения, можно определить непосредственно из графика. Для промежуточных значений доз соответствующие расстояния могут быть определены путем интерполяции.

VIII.40. Приведенные выше данные относятся к воздушному взрыву. При наземном (надводном) взрыве наблюдается некото-



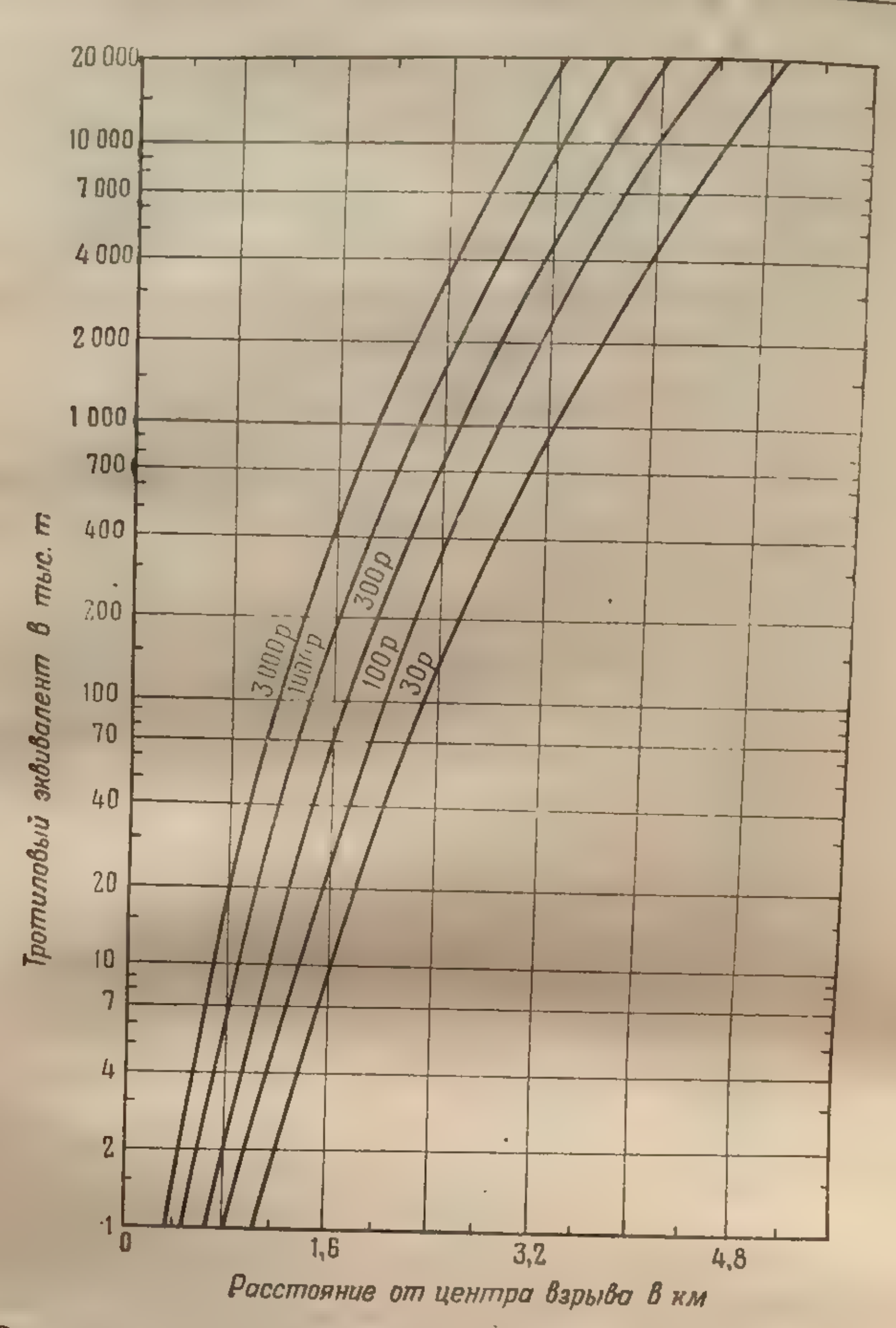


Рис. VIII.39. Зависимость между величиной данной дозы начального гамма-излучения, тротиловым эквивалентом и расстоянием от центра взрыва

рое уменьшение величины полученной дозы, обусловленное поглощением излучений пылью и обломками, поднятыми вверх взрывом. Однако это уменьшение не очень велико; поэтому расстояние от центра взрыва, на котором получается данная доза гамма-лучей, например 300 *р*, заметно не изменяется. Ввиду того, что на величину дозы при наземном (надводном) взрыве влияет ряд неопределенных факторов, учесть которые весьма трудно, вероятно,

лучше всего предположить, что графики, построенные для воздушных взрывов (рис. VIII.35а, VIII.35б и VIII.39), являются справедливыми также и для наземных (надводных) взрывов.

Обеспечение защиты от гамма-лучей

VIII.41. В процессе прохождения гамма-лучей через любое вещество наблюдается некоторое их поглощение (ослабление). Можно сказать, что уменьшение интенсивности излучения зависит в основном от массы вещества, находящегося между источником лучей и данной точкой. Это значит, что толщина слоя вещества, необходимого для ослабления интенсивности излучений до заданной величины, будет тем больше, чем меньше плотность этого вещества. Например, для достижения заданной степени ослабления гамма-лучей необходимая толщина слоя воды будет примерно в 7,8 раза больше толщины слоя стали.

Строго говоря, полностью поглотить гамма-лучи невозможно. Тем не менее, если между источником излучения, примером которого может служить взорвавшаяся ядерная бомба, и человеком поместить слой какого-либо вещества достаточной толщины, то полученная этим человеком доза может быть уменьшена до безопасной величины.

VIII.42. О способности данного материала уменьшать интенсивность излучения можно иметь представление по величине так называемого **слоя половинного ослабления** — такого слоя данного материала, который поглощает половину падающих на него гамма-лучей. Таким образом, если ничем не защищенный человек подвергается воздействию дозы начального гамма-излучения, равной, например, 400 *р*, то под прикрытием экрана из любого материала, толщина которого равна толщине слоя половинного ослабления, эта доза уменьшится примерно до 200 *р*. Прикрытие человека вторым слоем половинного ослабления уменьшит дозу еще в два раза, т. е. примерно до 100 *р*. Прикрытие каждым последующим слоем половинного ослабления уменьшит дозу излучения в два раза (рис. VIII.42). Таким образом, один слой половинного ослабления уменьшает дозу излучения до $^1/_2$ ее первоначальной величины; два таких слоя уменьшают первоначальную дозу до $^1/_4$, три слоя — до $^1/_8$, четыре слоя — до $^1/_{16}$ и т. д. Такое же общее правило можно применить по отношению к любому данному слою, например к слою десятикратного ослабления, который уменьшает интенсивность излучения в 10 раз; два таких слоя уменьшат интенсивность излучения в 10^2 раз, т. е. в 100 раз; три таких слоя — в 10^3 раз, т. е. в 1000 раз, и т. д.

VIII.43. Строго говоря, понятие — слой половинного ослабления — применимо лишь к монохроматическому гамма-излучению,

т. е. к излучению, состоящему из гамма-квантов одинаковой энергии при узком пучке излучения, или в случае, когда толщина защитного экрана (поглощающего материала) относительно мала. В действительности при осуществлении защиты от гамма-лучей, испускаемых ядерным взрывом, ни одно из этих условий не соблюдается. Так, энергия гамма-лучей изменяется в широких пределах,

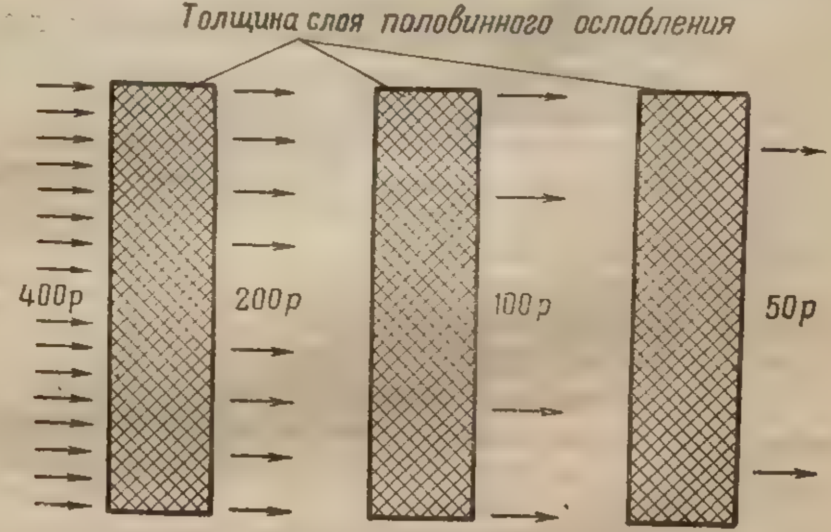


Рис. VIII.42. Схематическое изображение толщины слоя половинного ослабления

причем эти лучи распространяются по большой площади. Тем не менее приближенные значения величины слоя половинного ослабления, приведенные ниже, могут оказаться полезными для ориентировочного определения степени ослабления начального гамма-излучения, которая может быть достигнута при помощи защитного материала данной толщины.

VIII.44. Основными материалами, которые, по всей вероятности, найдут широкое применение для защиты от начальной радиации, испускаемой при ядерном взрыве, являются сталь, бетон, грунт и древесина. Приближенные значения толщины слоя половинного ослабления этих материалов по отношению к гамма-излучению приведены в табл. VIII.44. В эту таблицу включено значение толщины слоя половинного ослабления для воды, которое может представлять интерес в связи с воздушным взрывом над поверхностью воды. Данные, приведенные в таблице, применимы с достаточной точностью к защитным материалам большой толщины и к значениям энергии гамма-фотонов, которые имеют наибольшее значение для начальной ядерной радиации.

VIII.45. Из табл. VIII.44 видно, что слой стали толщиной в 3,8 *см* эквивалентен по защитным свойствам слою бетона толщиной 15 *см*, слою грунта толщиной 19 *см* и слою древесины толщиной

58,5 *см* (рис. VIII.45). Следовательно, слой стали данной толщины обеспечит более эффектную защиту, чем такой же слой бетона, а последний в свою очередь будет более эффективным, чем такой же слой грунта или древесины. В общем, как было отмечено в § VIII.41, чем больше плотность материала, тем меньше должна быть его толщина для того, чтобы уменьшить первоначальную ин-

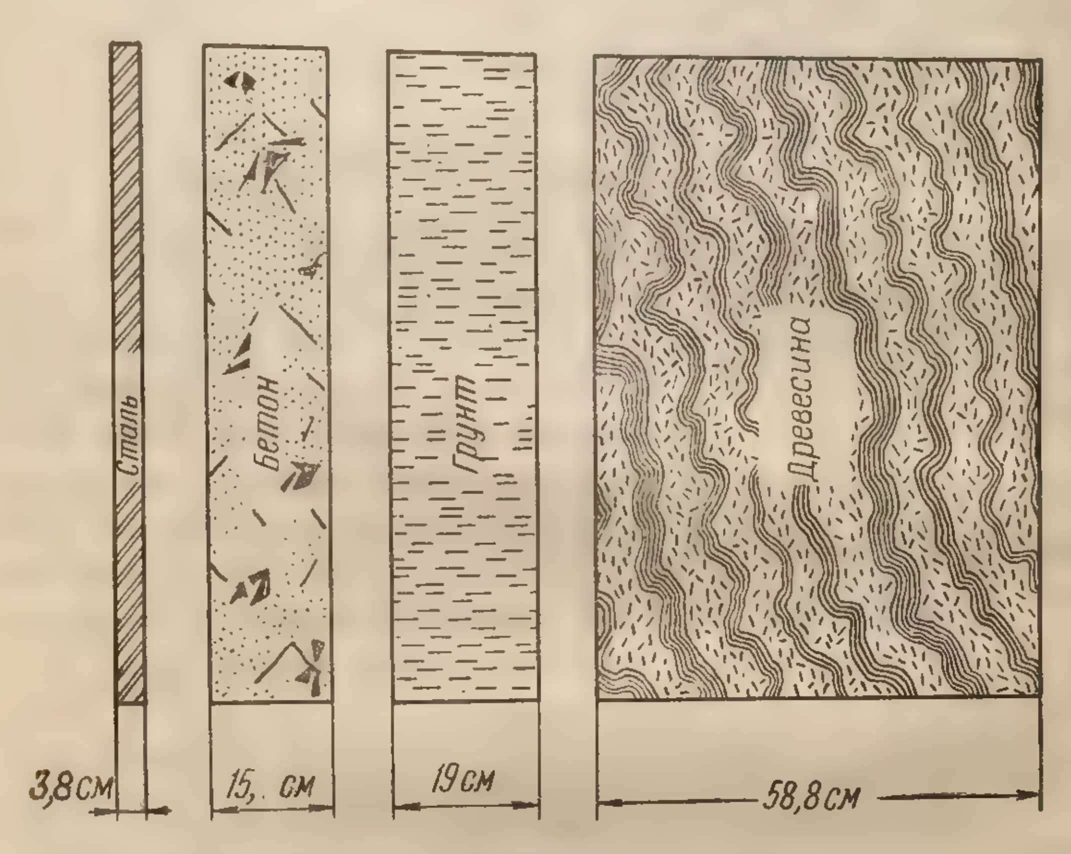


Рис. VIII.45. Сопоставление толщин слоев половинного ослабления различных материалов

тенсивность гамма-излучения до заданной величины. Данные, помещенные в последней графе табл. VIII.44, показывают, что произведение плотности защитного материала на толщину слоя половинного ослабления является приблизительно одинаковым для пяти материалов. Следовательно, если для одного из этих материалов значение толщины слоя половинного ослабления неизвестно, но имеется значение его плотности, то толщину слоя половинного ослабления можно достаточно точно определить, считая, что произведение плотности материала, выраженной в *г/см*³, на толщину слоя половинного ослабления, измеренную в сантиметрах, равно примерно 32.

слой грунта ... § VIII.41, чем больше плотность материала, тем меньше должна быть его толщина для того, чтобы уменьшить первоначальную ин-

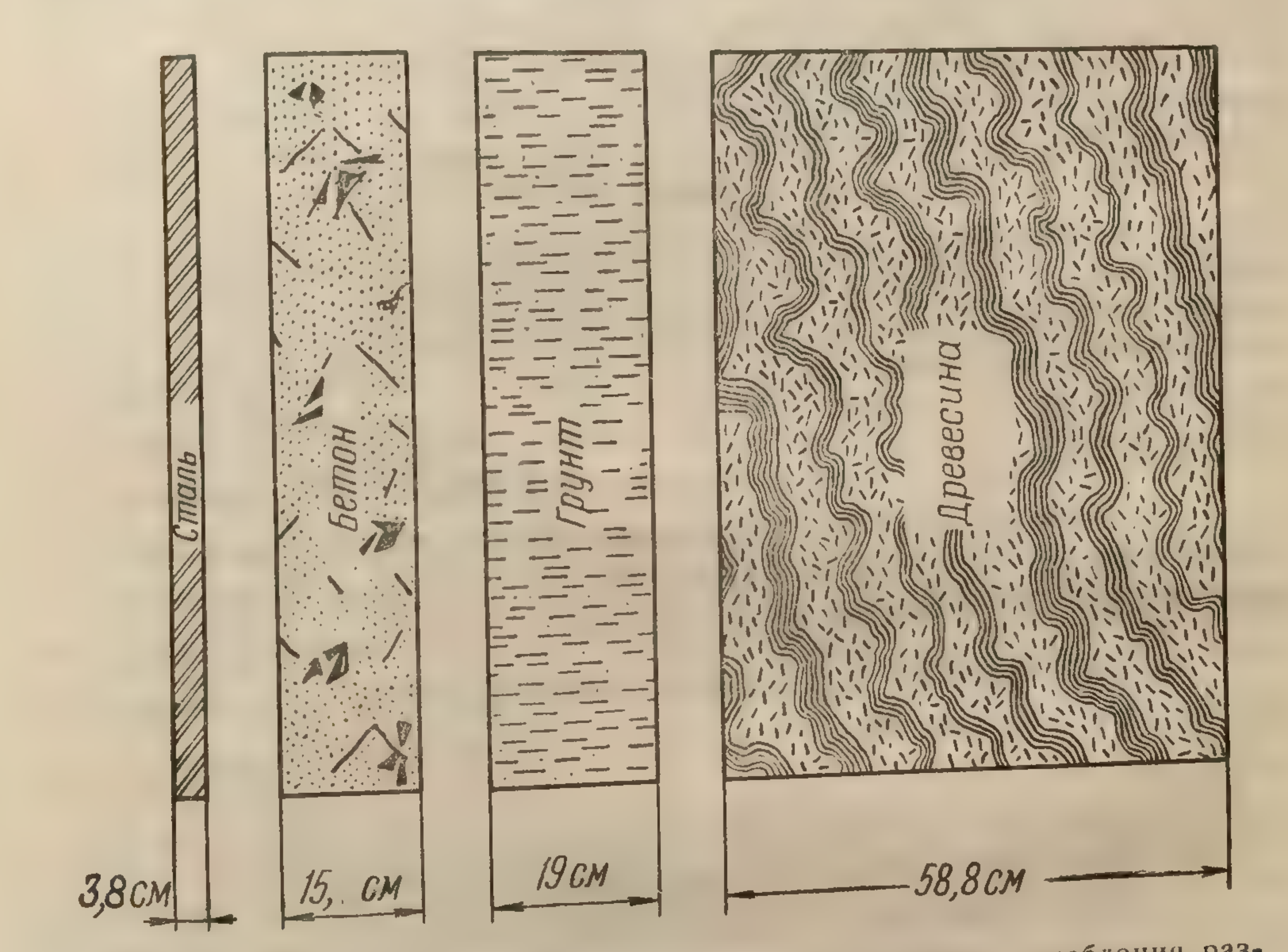


Рис. VIII.45. Сопоставление толщин слоев половинного ослабления различных материалов

Данные по-

Таблица VIII.44

Приближенные значения толщины слоя половинного ослабления начального гамма-излучения для некоторых материалов

Материал	Плотность, *г/см³*	Толщина слоя половинного ослабления, *см*	Произведение
Сталь	7,8	3,8	30
Бетон	2,3	15,2	35
Грунт	1,620	19	30,8
Вода	1,000	33	33,0
Дерево	0,550	58,4	32,2

VIII.46. Степень ослабления излучения данным слоем защитного материала, т. е. отношение дозы излучения, падающего на защитный экран, к дозе излучения, которая будет получена за экраном, можно легко определить, зная число слоев половинного ослабления и используя данные табл. VIII.44. Например, слой грунта толщиной 76 *см* содержит $\frac{76}{19} = 4{,}0$ слоя половинного ослабления. Тогда степень ослабления будет составлять $2^4 = 16$, и, следовательно, доза гамма-излучения за слоем грунта толщиной 76 *см* будет составлять приблизительно $\frac{1}{16}$ дозы, которая была бы получена без защитного экрана. Таким образом, в примере, рассмотренном в § VIII.36, доза излучения будет уменьшена до $\frac{375}{16} = 23{,}4$ *р*.

VIII.47. Более просто степень ослабления начального гамма-излучения некоторыми материалами (сталь, бетон, грунт, древесина) в зависимости от толщины их слоя можно определить из графика, изображенного на рис. VIII.47. Предположим, что в определенном месте доза падающего гамма-излучения составляет 500 *р*. Требуется определить толщину слоя бетона, которая бы обеспечила уменьшение этой дозы до 10 *р*. Необходимая степень ослабления равна $\frac{500}{10} = 50$. Из графика на рис. VIII.47 можно установить, что такая степень ослабления будет достигнута при толщине слоя бетона, равной 73,5 *см*.

VIII.48. В вакууме гамма-лучи распространяются прямолинейно со скоростью света. Однако при прохождении через атмосферу гамма-лучи, так же как и световое излучение, рассеиваются главным образом благодаря наличию кислорода и азота. В результате этого рассеяния гамма-лучи будут достигать того или иного объекта, расположенного на поверхности земли, со всех направлений. Бо́льшая часть полученной дозы будет обусловлена прямыми лучами, приходящими из области взрыва, но, кроме этого, значительное количество рассеянного излучения будет приходить в данное

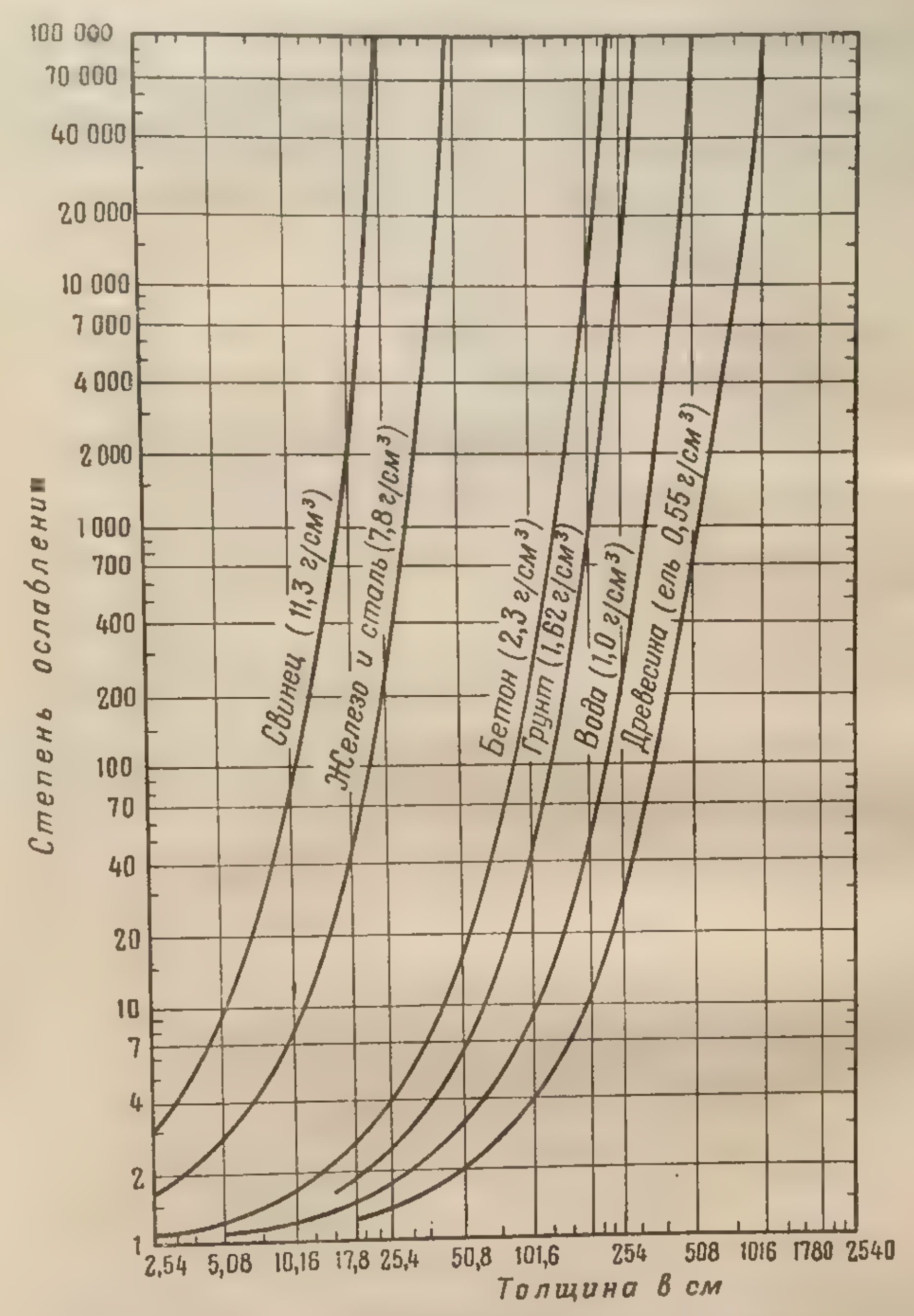


Рис. VIII.47. Степень ослабления начального гамма-излучения в зависимости от толщины слоя некоторых материалов

место и с других направлений. Этот факт имеет важное значение при решении проблемы защиты от ядерной радиации.

VIII.49. Человек, укрывшийся за стеной, насыпью или холмом, будет частично защищен от действия прямых гамма-лучей, однако вместе с этим он будет подвергаться воздействию рассеянного излучения. Схема воздействия на объект прямого и рассеянного излучений показана на рис. VIII.49а. Необходимая защита от гамма-лучей может быть обеспечена только в том случае, когда укры-

тие защищает человека со всех сторон (рис. VIII.49, *б*). В этом случае можно обеспечить ослабление как прямых, так и рассеянных излучений. Однако поскольку интенсивность рассеянного излучения меньше интенсивности прямого излучения, то для обеспе-

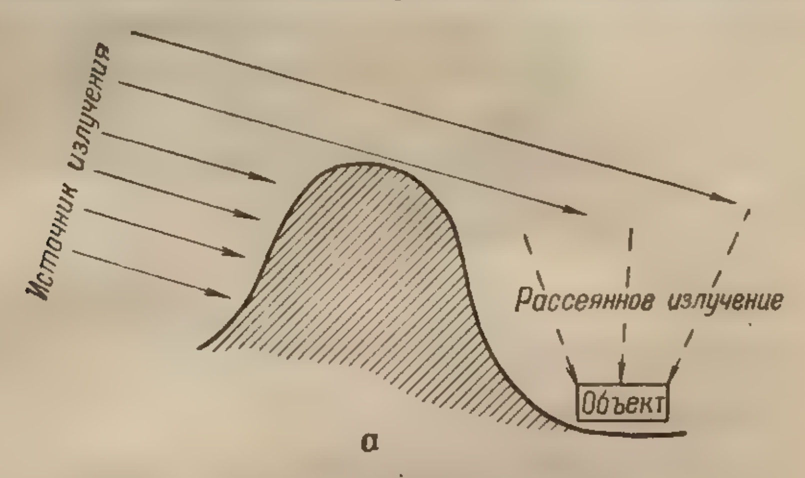
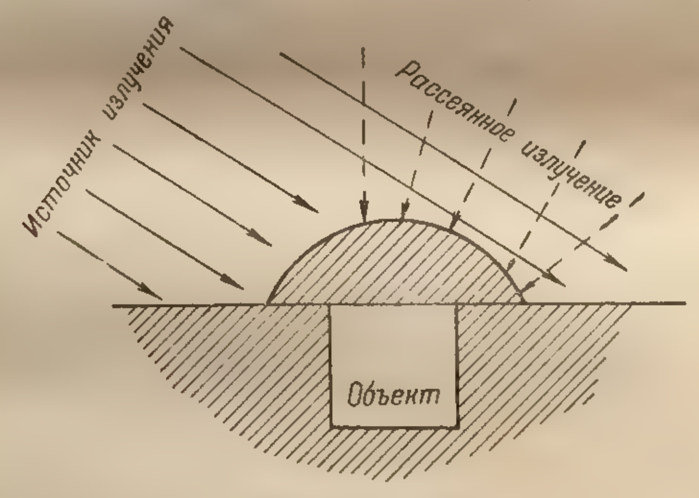


Рис. VIII.49а. Объект, подвергающийся воздействию рассеянного гамма-излучения

чения одинаковой степени защиты толщина слоя, предназначенного для защиты от прямых лучей (в направлении ожидаемого взрыва), должна быть больше толщины остальных слоев, предназначенных для ослабления рассеянного излучения.



б

Рис. VIII.49б. Объект, защищенный от воздействия рассеянного гамма-излучения

Скорость испускания начальной гамма-радиации

VIII.50. При расчетах доз радиации, основанных на данных, приведенных на рис. VIII.35а, исходят из предположения, что облучение продолжается в течение 1 мин. Это время, как указыва-

тие защищает человека со всех сторон (рис. VIII.49, *б*). В этом случае можно обеспечить ослабление как прямых, так и рассеянных излучений. Однако поскольку интенсивность рассеянного излучения меньше интенсивности прямого излучения, то для обеспе-

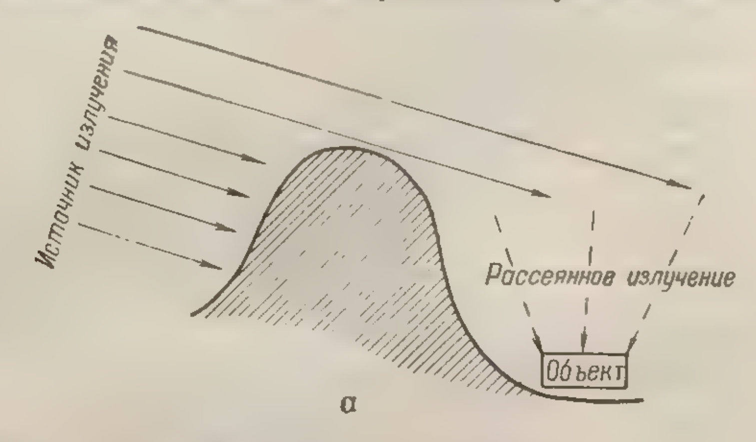


Рис. VIII.49а. Объект, подвергающийся воздействию рассеянного гамма-излучения

чения одинаковой степени защиты толщина слоя, предназначенного для защиты от прямых лучей (в направлении ожидаемого взрыва), должна быть больше толщины остальных слоев, предназначенных для ослабления рассеянного излучения.

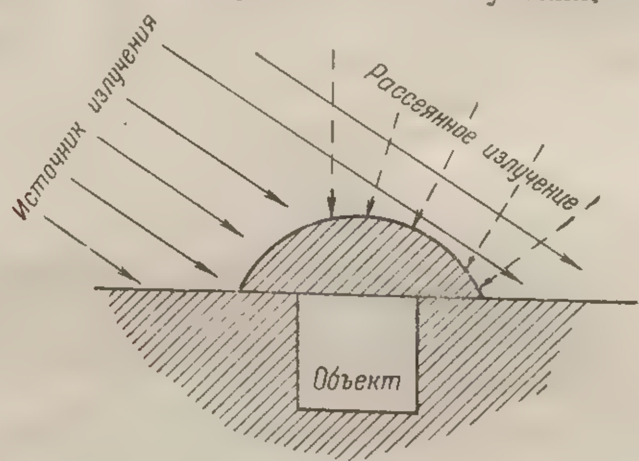


Рис. VIII.49б. Объект, защищенный от воздействия рассеянного гамма-излучения

Скорость испускания начальной гамма-радиации

VIII.50. При расчетах доз радиации, основанных на данных, приведенных на рис. VIII.35а, исходят из предположения, что облучение продолжается в течение 1 мин. Это время, как указыва-

лось, установлено с некоторой произвольностью и представляет собой период, в течение которого происходит испускание начальной ядерной радиации. Однако для определения скорости испускания излучения при взрыве бомбы необходимо иметь некоторые исходные данные. Если эти данные известны, то можно составить неко-

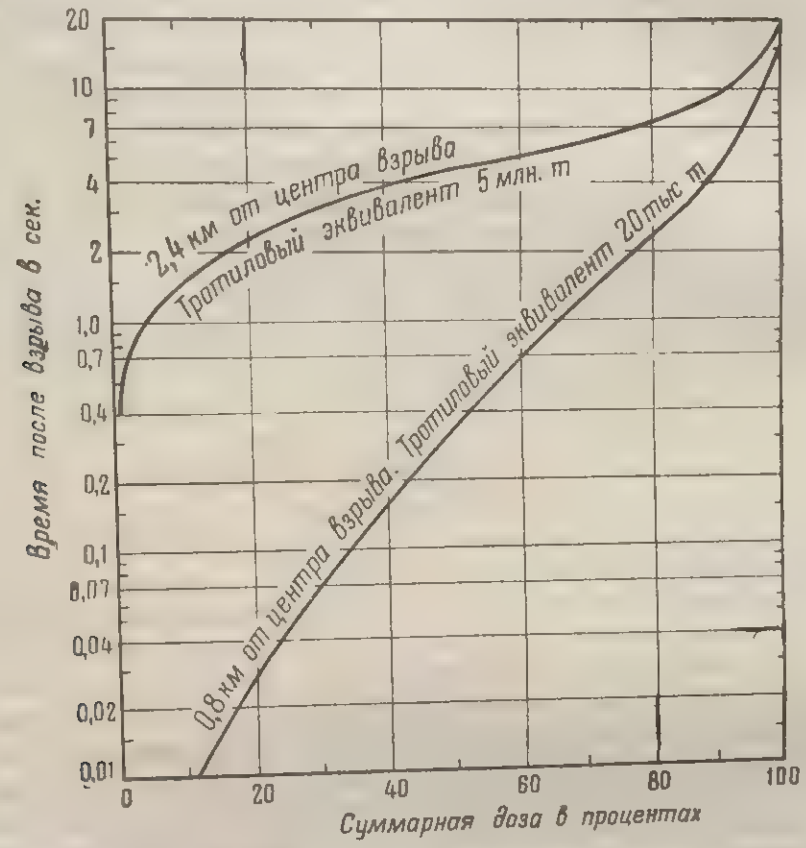


Рис. VIII.51. Зависимость суммарной дозы начального гамма-излучения, выраженной в процентах, от времени облучения (для двух различных случаев)

торое представление о величине дозы, которая будет получена в том случае, если бы удалось избежать длительного воздействия начальной радиации, например путем использования каких-либо укрытий спустя одну — две секунды после момента появления яркой вспышки взрыва.

VIII.51. Интенсивность начальных гамма-лучей в данной точке зависит от ряда условий, главными из которых являются мощность ядерного взрыва и расстояние от этой точки до места взрыва. График зависимости суммарной дозы начального гамма-излучения, выраженной в процентах, от времени облучения для двух различных случаев показан на рис. VIII.51. Нижняя кривая графика выражает указанную зависимость для точки, находящейся на рас-

стоянии 800 *м* от центра воздушного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*, а верхняя показывает ту же зависимость для расстояния 2400 *м* и тротилового эквивалента в 5 млн. *т*. Из графика видно, что в течение первой секунды после взрыва в первом случае будет получено около 65%, а во втором случае — примерно 4% суммарной дозы начального гамма-излучения.

VIII.52. Из изложенного выше в § VII.54 следует, что если человеку не позже чем через одну секунду после момента появления яркой вспышки взрыва удастся найти себе какое-либо укрытие, например, путем быстрого залегания лицом вниз (лучше всего за какой-нибудь прочный объект), то в некоторых случаях это может спасти человеку жизнь. Кривые на рис. VIII.51 показывают, что при ядерном взрыве с большим эквивалентом гамма-излучение испускается медленнее (в особенности на первых стадиях после взрыва), чем при взрыве малой мощности. Из этого вытекает, что при взрывах бомб крупного калибра избежать облучения одной и той же дозой начального гамма-излучения практически легче, чем при взрывах бомб малого калибра.

НЕЙТРОНЫ

Источники нейтронов

VIII.53. Хотя нейтроны являются ядерными частицами, обладающими сравнительно большой массой, а гамма-лучи представляют собой электромагнитные излучения, аналогичные рентгеновским лучам, однако их поражающее действие на организм по своему характеру одинаково. Человек своими органами чувств так же, как и в случае гамма-излучения, может обнаружить лишь очень большие дозы нейтронов. Нейтроны могут распространяться в воздухе на значительные расстояния и вызывать поражения, размеры которых значительно больше, чем можно было бы ожидать, исходя из той небольшой энергии взрыва, которая приходится на их долю (около 0,025%).

VIII.54. Почти все нейтроны, испускаемые при ядерном взрыве, освобождаются либо в процессе деления, либо в процессе синтеза (см. § I.33, I.57). Все нейтроны, испускаемые при синтезе, и больше чем 99% нейтронов, испускаемых в процессе деления, выделяются почти мгновенно, вероятно, в течение миллионных долей секунды после момента взрыва. Эти нейтроны называются **мгновенными**.

VIII.55. Кроме того, в последующее после взрыва время испускается около одного процента нейтронов деления, называемых **запаздывающими** нейтронами. Однако, так как большая часть этих запаздывающих нейтронов испускается в течение первой минуты после взрыва, их поток представляет собой составную часть начальной ядерной радиации. Некоторые нейтроны образуются также в результате воздействия гамма-лучей, обладающих высокой

энергией, на ядра веществ, из которых изготовлена ядерная бомба. Однако эти нейтроны составляют ничтожную долю общего их количества, и поэтому ими можно пренебречь.

VIII.56. Хотя, как отмечалось выше, фактически все мгновенные нейтроны освобождаются в течение миллионных долей секунды после взрыва, они несколько задерживаются в процессе преодоления оболочки, окружающей взорвавшийся ядерный заряд. Это замедление является следствием многочисленных рассеивающих столкновений нейтронов с ядрами, имеющимися в остатках бомбы. В результате этих столкновений нейтроны, прежде чем вырваться за пределы взорвавшейся бомбы, проходят сложный зигзагообразный путь. Они обладают довольно большими скоростями, но так как среднее фактическое расстояние, преодолеваемое нейтронами, относительно велико, то требуется некоторое время, прежде чем они достигнут внешней поверхности огненного шара. Однако запоздание, с которым вылетают мгновенные нейтроны в окружающее пространство, составляет не более одной сотой доли секунды после момента взрыва.

VIII.57. Необходимо отметить, что скорость движения нейтронов меньше скорости света. Тем не менее время, необходимое для того, чтобы почти все нейтроны прошли расстояние от точки взрыва до места, где они представляют угрозу поражения, составляет около 1 секунды после момента взрыва. Таким образом, попытка найти укрытие (см. § VIII.52) с целью уменьшения величины получаемой дозы нейтронов является малоэффективной.

Распределение нейтронов по энергиям

VIII.58. Нейтроны, образующиеся в процессе деления, обладают различными энергиями, но все они фактически находятся в области высоких энергий. Такие нейтроны, обладающие высокими энергиями, называются **быстрыми нейтронами**, причем их энергия по своему характеру является кинетической. В процессе столкновений быстрых нейтронов с ядрами атомов между ними происходит обмен кинетической энергией. В результате такого перераспределения энергии быстрые нейтроны теряют некоторую часть своей энергии и становятся, следовательно, более медленными. Таким образом, нейтроны, вырвавшиеся после взрыва бомбы в окружающее пространство, охватывают широкий диапазон скоростей (или энергий): от быстрых через промежуточные до медленных. Вследствие того, что нейтроны, обладающие наименьшей скоростью, находятся в тепловом (или температурном) равновесии с окружающей средой, их часто называют **тепловыми нейтронами**.

VIII.59. После выхода нейтронов за пределы взорвавшейся бомбы они снова подвергаются большому числу рассеивающих столкновений с ядрами азота, кислорода и других элементов, находящихся в атмосфере. Эти столкновения происходят **в воздухе**

с меньшей частотой, чем в пределах ядерной бомбы. Это является следствием того, что в атмосфере имеют место более низкое давление и меньшая концентрация ядер. Тем не менее результаты этих столкновений имеют важное значение. Прежде всего доля энергии, теряемая нейтроном при одном столкновении с ядром, является в среднем тем большей, чем легче это ядро. А так как ядра атомов кислорода и азота являются относительно легкими, то нейтроны наиболее заметно замедляются именно в результате столкновений в воздухе.

VIII.60. Далее, при некоторых столкновениях, особенно с ядрами азота, может происходить захват нейтронов, в результате которого они, как таковые, полностью исчезают (см. § VIII.9). Вероятность захвата является наибольшей для медленных нейтронов. Следовательно, при прохождении нейтронов через воздух, например, от места взрыва бомбы до какой-либо точки на поверхности земли, они вступают во многие взаимодействия, приводящие к потере нейтронов. Быстрые нейтроны, имеющие высокие энергии, обладают способностью терять некоторую часть своей энергии и вследствие этого замедляться. В то же время чем меньше скорость нейтронов, тем вероятность их захвата, а следовательно, и исчезновения из состава ядерного излучения больше; при этом необходимо иметь в виду, что захват нейтронов обычно сопровождается испусканием гамма-лучей.

VIII.61. Для измерения интенсивности потока нейтронов, образующихся при взрыве ядерной бомбы, а также при изучении их биологического действия важно иметь некоторые данные о том, каким образом изменяется **нейтронный спектр** (распределение нейтронов по энергиям) в зависимости от расстояния от места взрыва. Из ряда измерений, произведенных в ходе опытных ядерных взрывов в Неваде в 1955 г., вытекает (таковы по крайней мере были показания применявшейся аппаратуры), что энергетический спектр потока нейтронов остается одинаковым на таких расстояниях от центра взрыва, которые представляют интерес с точки зрения их биологического действия. Такой спектр принято называть **равновесным спектром.**

VIII.62. Возможное объяснение этого важного факта заключается в том, что вследствие сочетания различных условий потеря медленных нейтронов, являющаяся результатом их захвата, например, ядрами азота, компенсируется процессами, приводящими к замедлению быстрых нейтронов. Общее количество нейтронов, приходящееся на единицу площади, тем меньше, чем больше расстояние рассматриваемой точки от места взрыва. Это вытекает из того, что по мере удаления от места взрыва площадь, на которой распределяются нейтроны, становится все больше (см. § VIII.34), и, кроме того, некоторая часть быстрых нейтронов с увеличением расстояния замедляется, что благоприятствует их захвату и приводит к потере этих нейтронов. Однако при этом доля нейтронов

с энергиями, находящимися в определенном диапазоне, остается в основном одинаковой на всех расстояниях, представляющих практический интерес.

Измерение потока нейтронов

VIII.63. Нейтроны, будучи электрически нейтральными частицами, при прохождении через вещество сами непосредственно не вызывают его ионизацию, или возбуждение. Они могут, однако, вызвать ионизацию косвенным путем, взаимодействуя с некоторыми легкими ядрами. Когда быстрый нейтрон сталкивается, например, с ядром атома водорода, он может передать бо́льшую часть своей энергии этому ядру. В результате ядро водородного атома освобождается от связанного с ним электрона и начинает двигаться в виде протона, обладающего высокой энергией (см. § VIII.16). Такой протон при прохождении через газ может создавать значительное количество пар ионов. Таким образом, взаимодействие быстрого нейтрона с атомом водорода (или любым другим веществом, содержащим водород) может вызвать ионизацию косвенно. Подобным же образом протекает ионизация, хотя и в меньшей степени, при столкновении быстрых нейтронов с другими легкими ядрами, например с ядрами углерода, кислорода и азота. Ионизация, обусловленная взаимодействием быстрых нейтронов с ядрами водорода и азота в ткани организма, является главной причиной биологического поражения, вызываемого нейтронами.

VIII.64. Нейтроны, обладающие малыми и средними скоростями, косвенно могут вызывать ионизацию также и другими путями. При захвате таких нейтронов легким изотопом бора (бора-10) образуются две электрически заряженные частицы — ядро гелия (альфа-частица) и ядро лития, обладающие высокой энергией. Каждая из этих частиц может вызывать образование ионных пар. Ионизация, вызванная косвенным путем нейтронами, может быть также результатом деления ядер плутония или ядер изотопов урана. Осколки деления представляют собой электрически заряженные частицы (ядра), обладающие высокой энергией; при движении эти осколки вызывают на своем пути значительную ионизацию.

VIII.65. Все указанные выше процессы, приводящие к ионизации косвенным путем, могут быть использованы для обнаружения нейтронов и измерения интенсивности их потока. Приборы, используемые для этой цели, такие, как борные счетчики и камеры деления, по принципу действия напоминают счетчики Гейгера, обычно применяемые для измерения гамма-излучений. Были разработаны также **тканеэквивалентные камеры**, в которых ионизация, вызванная нейтронами косвенным путем, сопоставляется с величиной энергии, которая бы выделилась при взаимодействии этих нейтронов с животной тканью.

VIII.66. Кроме отмеченных выше методов, для обнаружения и

измерения потока нейтронов, обладающих различными скоростями, широко используется так называемый метод **активации.** Некоторые элементы в результате захвата нейтронов превращаются в радиоактивные изотопы (см. § VIII.8). Этот метод основан на определении величины наведенной активности, которая измеряется по степени ионизации, создаваемой испускаемыми бета-частицами или гамма-лучами.

В качестве детектора обычно используется тонкий лист (или фольга), толщина которого должна быть такой, чтобы его влияние на нейтронное поле было незначительным.

VIII.67. **Метод деления**, как это видно из его названия, основан на использовании реакции деления. Тонкий слой делящегося материала, например изотопа урана или плутония, подвергается облучению нейтронами. Образующиеся при этом продукты деления представляют собой радиоактивные вещества, испускающие бета-частицы и гамма-лучи. Путем измерения радиоактивности, созданной таким образом, можно определить количество делений и, следовательно, интенсивность потока нейтронов.

VIII.68. Доза нейтронов, измеренная в *рад*, поглощенная в рассматриваемой точке, может быть определена расчетным путем по результатам измерений, полученным при облучении фольги. Приборы, основанные на измерении ионизации, обычно калибруются по данным, полученным при активации фольги, и поэтому они могут быть также использованы для определения дозы нейтронов с определенной энергией, выраженной в *рад*. Таким образом, имеющиеся методы позволяют определять дозы поглощенных нейтронов, измеренные в *рад*.

VIII.69. Для определения величины биологической дозы в *брэ*, в том случае, если уже измерена поглощенная доза в *рад*, необходимо знать значение относительной биологической эффективности нейтронов (*обэ*). Значение этой величины для нейтронов, образующихся при ядерном взрыве, было в течение длительного времени не вполне определенным. Опыты, производившиеся над мышами, дают основание полагать, что значение относительной биологической эффективности (*обэ*) нейтронов, испускаемых при взрыве ядерной бомбы, для таких расстояний, на которых можно ожидать поражения людей (вследствие облучения нейтронами), равно примерно 1,7. Некоторое подтверждение применимости такого значения по отношению к человеку было получено путем анализа данных о радиационных поражениях людей, собранных после ядерных взрывов в Японии [1].

[1] Значение относительной биологической эффективности (*обэ*) нейтронов, испускаемых при взрыве ядерной бомбы, равное 1,7, может быть несколько завышено; однако в настоящее время это значение, пожалуй, является наиболее достоверным. В литературе встречается значение *обэ*, равное 10 для быстрых нейтронов и 3—4 для медленных (тепловых) нейтронов; однако эти значения относятся, в частности, к случаям невидимых нарушений зрения, ведущих к образованию катаракты.

Зависимость дозы нейтронов от расстояния

VIII.70. В то время как величину дозы начального гамма-излучения ядерного взрыва можно определить сравнительно простым способом и получить данные, соответствующие результатам наблюдений, производившихся в ряде испытаний (см. § VIII.35), расчет дозы нейтронов является делом значительно более сложным. Эта доза весьма заметно изменяется в зависимости от характеристик взорванного ядерного устройства. Например, материалы, из которых изготовлена бомба, оказывают значительное влияние на количество захваченных нейтронов, а следовательно, и на число нейтронов деления, которым удается вырваться в окружающую среду, и на их распределение по энергиям. Кроме того, как указывалось в § I.15, термоядерная реакция между дейтерием и тритием сопровождается освобождением нейтронов с высокой энергией. Следовательно, нужно ожидать, что при ядерном взрыве, в котором часть освобождающейся энергии является результатом термоядерных процессов (синтеза), доля быстрых нейтронов, обладающих высокой энергией, будет больше, чем при взрыве одних только делящихся веществ.

VIII.71. Очевидно поэтому, что как количество нейтронов, образующихся на каждую тысячу тонн тротилового эквивалента взрыва, так и их энергетический спектр могут быть различными в зависимости от типа ядерного оружия. Следовательно, использование единой кривой зависимости дозы нейтронов от расстояния аналогично использованию кривой, построенной для начального гамма-излучения (см. рис. VIII.35а), для оценки дозы нейтронов, полученной при взрыве любой заданной мощности, связано с риском допустить ошибку. Такая кривая, выражающая зависимость дозы нейтронов от расстояния для воздушного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, представлена на рис. VIII.71. На этой кривой доза нейтронов измерена в биологических рентген-эквивалентах (*брэ*), вследствие чего эта доза служит мерой биологической эффективности. Чтобы определить величину дозы, полученной на заданном расстоянии от центра взрыва для тротилового эквивалента W тыс. *т*, необходимо значение дозы, определенное для этого расстояния из графика, умножить на W. Этот метод расчета не является абсолютно точным, однако он, вероятно, отвечает требованиям практики. Как и для других видов излучения, доза нейтронов с увеличением расстояния от центра взрыва уменьшается частично вследствие того, что нейтроны распределяются на все большей площади (обратно пропорционально квадрату расстояния), и частично из-за их поглощения и рассеяния в окружающей среде.

VIII.72. График, показанный на рис. VIII.71, можно преобразовать в другой график, изображенный на рис. VIII.72. На этом графике показана зависимость величины дозы нейтронов, выражен-

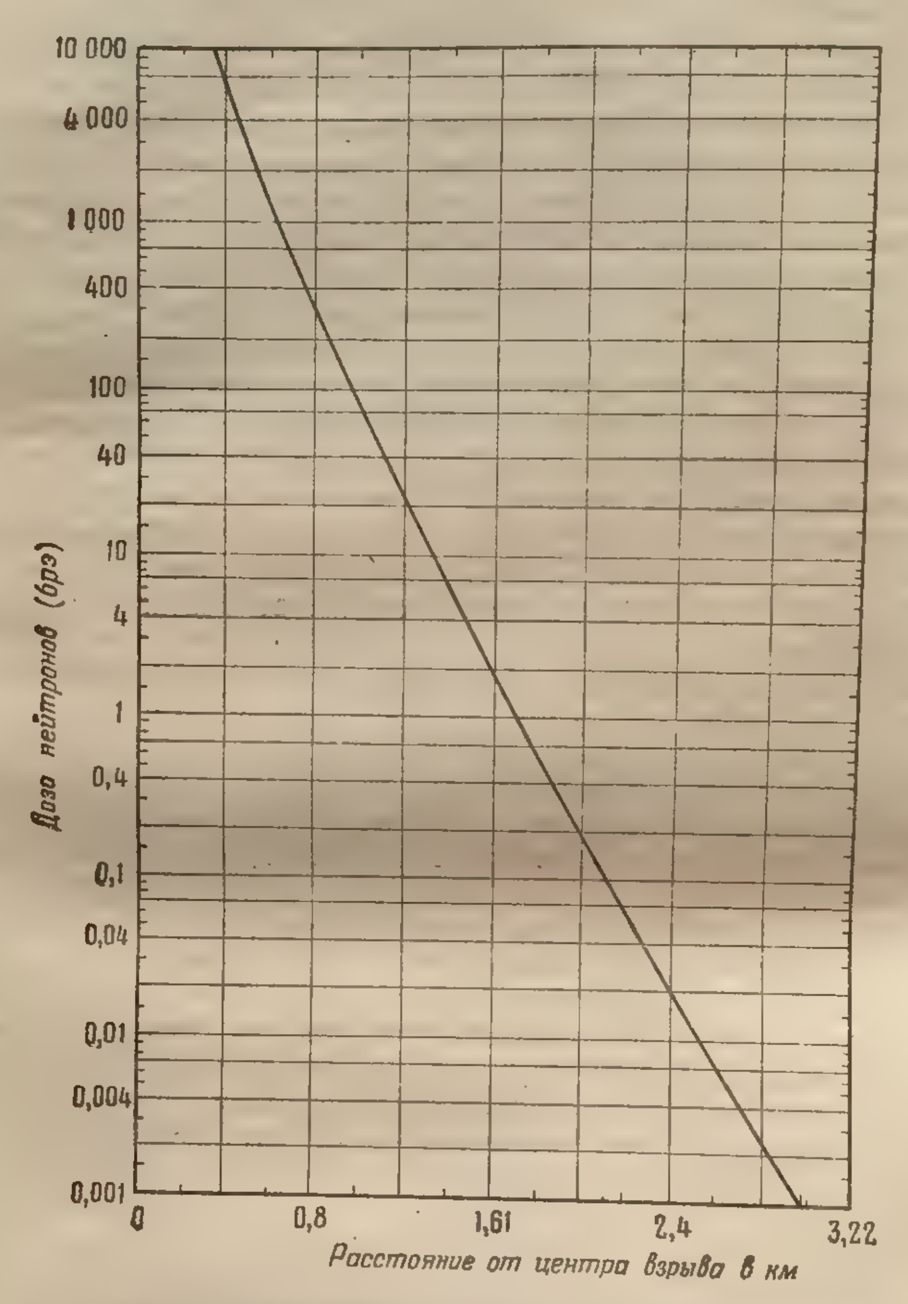


Рис. VIII.71. Зависимость дозы нейтронов от расстояния до центра воздушного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

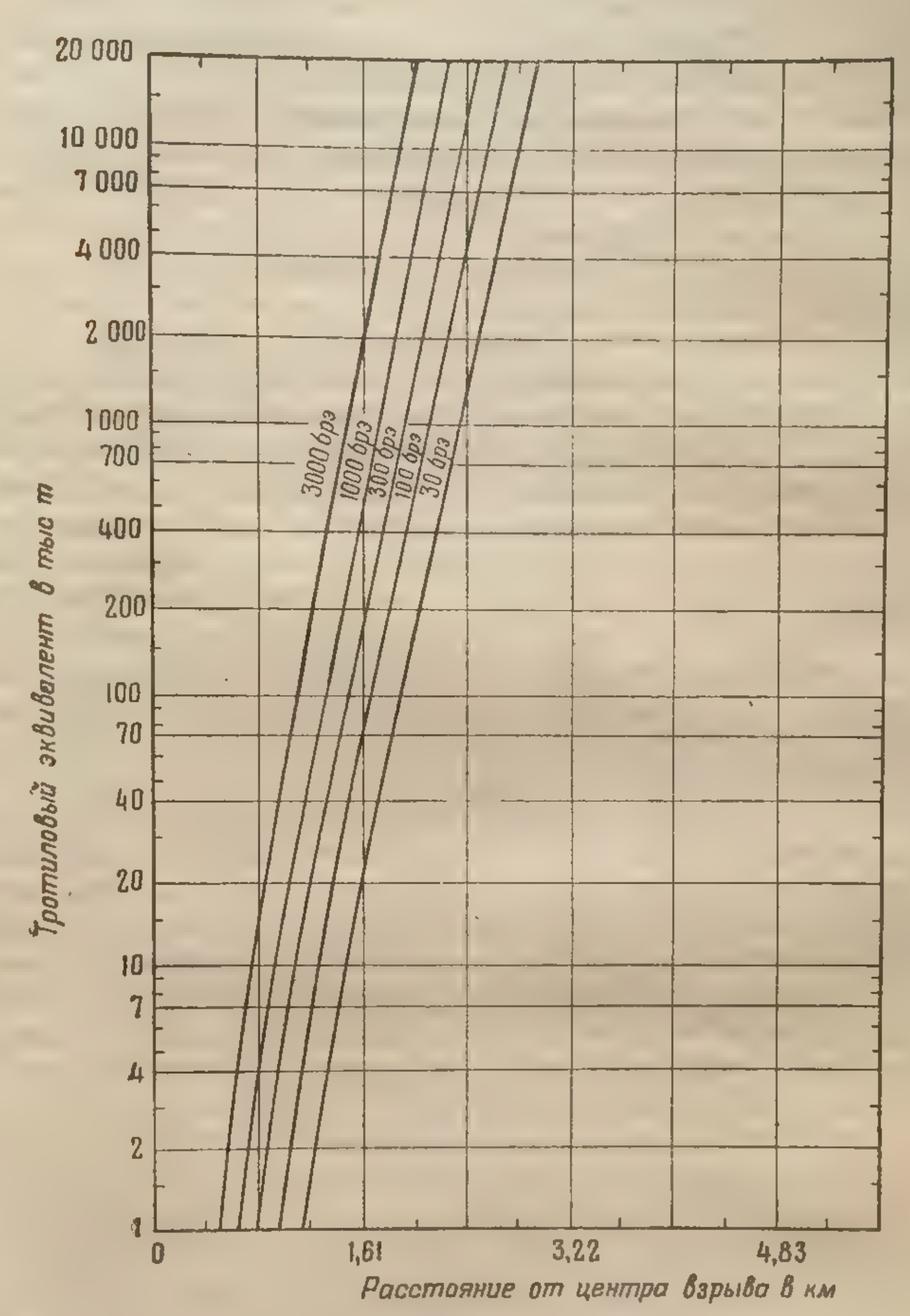


Рис. VIII.72. Зависимость величины дозы нейтронов от тротилового эквивалента и расстояния до центра воздушного взрыва

ной в *брэ*, от расстояния до центра воздушного взрыва и значения тротилового эквивалента. По данным графика, показанного на рис. VIII.71, с применением закона подобия или графика (рис. VIII.72) с применением интерполяции между кривыми можно, например, вычислить, что доза нейтронов, полученная на расстоянии 1,6 *км* от центра воздушного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 100 тыс. *т*, составляет около 200 *брэ*.

Защита от нейтронов

VIII.73. Защита от нейтронов является более трудной проблемой, чем защита от гамма-лучей. Для обеспечения защиты от гамма-излучения необходимо разместить между источником гамма-лучей и облучаемым объектом слой материала достаточной массы. Тяжелые металлы, такие, как железо и свинец, вследствие их высокой плотности являются хорошими материалами для защиты от гамма-лучей. Однако использование для защиты от нейтронов одних этих металлов не может дать вполне удовлетворительного результата. Защитный экран, изготовленный из стали, приведет лишь к некоторому ослаблению нейтронного потока, испускаемого взорвавшейся ядерной бомбой, однако это ослабление будет меньшим, чем при применении защитного экрана, изготовленного из особого бетона. Описание данного типа экрана приводится ниже.

VIII.74. Ослабление нейтронов, испускаемых при ядерном взрыве, включает в себя несколько отдельных процессов. Во-первых, очень быстрые нейтроны должны быть замедлены до средних скоростей; для этого требуется соответствующий материал, обладающий хорошей способностью неупруго рассеивать нейтроны. Такой материал должен содержать, например, барий или железо. Затем нейтроны, обладающие средними скоростями, должны быть замедлены при помощи материалов, содержащих элементы с небольшими атомными весами, до малых скоростей. В этом отношении наиболее подходящим материалом является вода, так как оба элемента, из которых она состоит (водород и кислород), имеют небольшие атомные веса. Затем медленные (тепловые) нейтроны должны быть поглощены. Это не представляет собой сложной проблемы, так как водород, содержащийся в воде, легко обеспечивает достижение этой цели. К сожалению, однако, большая часть реакций, связанных с захватом нейтронов, сопровождается испусканием гамма-лучей (см. § VIII.8). Следовательно, для того, чтобы свести к минимуму выход из защитного экрана гамма-лучей, возникающих при захвате нейтронов, он должен включать в себя достаточное количество материалов, обладающих хорошей способностью ослаблять гамма-лучи.

VIII.75. Как правило, бетон или сырой грунт обеспечивает достаточно хорошую защиту как от нейтронов, так и от гамма-лучей.

Хотя эти материалы в обычном виде не содержат элементов с большим атомным весом, однако они имеют в своем составе довольно большое количество водорода, обеспечивающего замедление и захват нейтронов, а также кальция, кремния и кислорода, хорошо поглощающих гамма-излучение. Например, слой бетона толщиной 25,4 *см* уменьшает дозу нейтронов примерно в 10 раз, а толщиной в 50,8 *см* — приблизительно в 100 раз. Начальное гамма-излучение будет ослабляться бетоном в меньшей степени, но при достаточно больших толщинах им можно пользоваться для защиты как от нейтронов, так и от гамма-лучей, испускаемых при ядерном взрыве. Сырой грунт, как можно полагать, будет вести себя таким же образом.

VIII.76. Увеличения степени ослабления ядерных излучений можно достигнуть использованием измененного по составу («тяжелого») бетона, который приготовляется путем добавления к обычной бетонной смеси значительного количества железной руды, например бурого железняка (лимонита), и включения в нее небольших кусочков железа, для чего можно использовать обрезки, остающиеся после штамповки. Наличие тяжелого элемента повышает защитные свойства материала при данной толщине (или объеме) как от нейтронов, так и от гамма-лучей. Для уменьшения дозы нейтронов в 10 раз требуется слой тяжелого бетона толщиной примерно в 18 *см.*

VIII.77. Наличие бора и его соединений в составе материалов, предназначенных для ослабления потока нейтронов, улучшает защитные свойства этих материалов. Это вытекает из того, что легкие изотопы (бор-10) лучше захватывают медленные нейтроны (см. § VIII.64), причем этот процесс сопровождается испусканием гамма-лучей средней энергии (0,48 *Мэв*), которые сравнительно легко могут быть ослаблены. Следовательно, чтобы улучшить способность бетона к поглощению нейтронов, в него можно ввести, например, минерал колеманит, который содержит большое количество бора.

VIII.78. В § VIII.49 отмечалось, что из-за рассеяния, которому подвергаются гамма-лучи, экранирование должно обеспечивать защиту от гамма-излучения со всех направлений. Примерно то же самое можно сказать и в отношении нейтронов. Как указывалось выше, нейтроны при прохождении через воздух сильно рассеиваются, и поэтому, когда они достигают поверхности земли, даже на средних расстояниях от места взрыва, направления их движения становятся самыми разнообразными. Однако на значительных расстояниях от места взрыва многие рассеянные нейтроны обладают сравнительно небольшими энергиями, вследствие чего значение таких нейтронов в создании общей биологической дозы относительно невелико. Частичная защита от поражения нейтронами может быть, следовательно, достигнута при использовании в качестве экранов различных предметов или сооружений, которые защищают от пря-

мого нейтронного потока, распространяющегося со стороны взрыва. Более полная защита, как и защита от гамма-лучей, обеспечивается замкнутыми укрытиями.

НАЧАЛЬНЫЕ ГАММА-ЛУЧИ И НЕЙТРОНЫ

Сравнение доз

VIII.79. В предыдущих разделах данной главы были отдельно рассмотрены гамма-лучи и нейтроны. Испускание гамма-лучей и нейтронов в течение первой минуты с момента взрыва, как указывалось ранее, составляет начальную радиацию ядерного взрыва. В связи с этим представляет значительный интерес сравнение доз, получаемых за счет этих двух типов излучения, и рассмотрение их комбинированного действия, так как характер поражений людей, вызываемых этими излучениями, в основном одинаков. Хотя величина дозы ядерной радиации не изменяется строго пропорционально мощности взрыва, однако общие выводы заметно не изменятся, если принять, что такая пропорциональность существует.

VIII.80. Для получения указанного сопоставления на графике, изображенном на рис. VIII.80, совмещены кривые рис. VIII.35а и VIII.71, которые выражают соответственно изменение величины доз гамма-лучей и нейтронов при воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*. На графике показана кривая, характеризующая изменение суммарной биологической дозы, измеренной в *бэр*. Анализ характера изменения величины доз гамма-лучей и нейтронов показывает, что вблизи центра взрыва доза нейтронов больше дозы гамма-лучей почти в 2 раза. Однако по мере увеличения расстояния величина дозы нейтронов уменьшается значительно быстрее величины дозы гамма-излучения; поэтому начиная с определенного расстояния доза гамма-излучения становится больше дозы нейтронов. В конечном счете на сравнительно больших расстояниях от места взрыва величина дозы нейтронов оказывается незначительной по сравнению с величиной дозы гамма-излучения.

Зависимость дозы нейтронов и гамма-лучей от мощности взрыва

VIII.81. Данные графика, изображенного на рис. VIII.81, позволяют проанализировать еще один интересный вопрос, связанный с только что рассмотренным вопросом. Если, например, принять величину суммарной биологической дозы начальной ядерной радиации, равной в одном случае 600 и в другом 200 *бэр*, то можно построить соответственно две кривые изменения соотношения до-

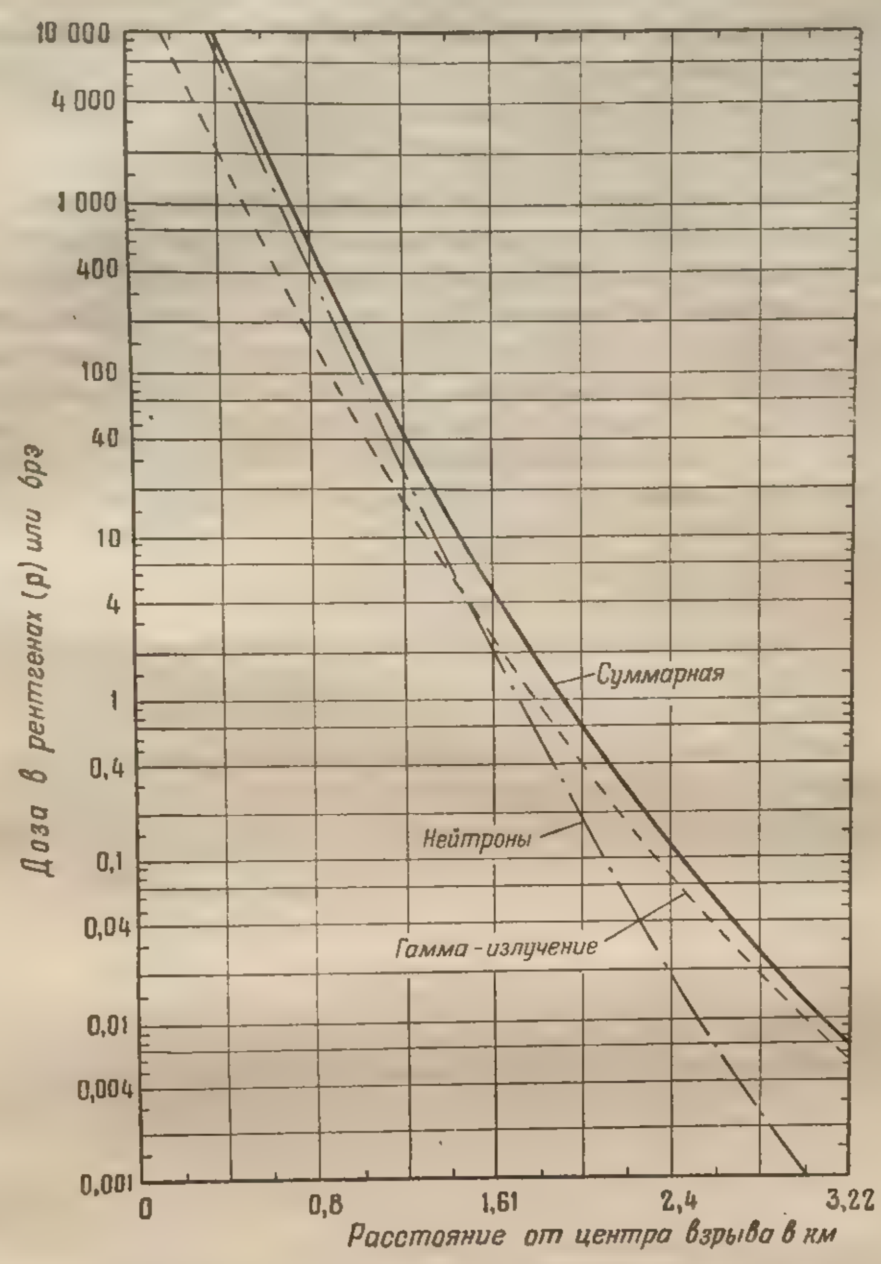


Рис. VIII.80. Сопоставление доз нейтронов и начального гамма-излучения при воздушном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

лей от этих суммарных доз, обусловленных как гамма-лучами, так и нейтронами в зависимости от мощности ядерного взрыва. Указанные значения суммарных доз выбраны потому, что они соответствуют расстояниям, на которых возможна эффективная защита при помощи укрытий с небольшими защитными толщами, например, для грунта защитный слой может иметь толщину 90 *см*. Из рис. VIII.81 видно, что при этих заданных условиях значительные доли от суммарной дозы излучения, обусловленные нейтронами,

соответствуют малым значениям тротилового эквивалента. Для средних и больших значений тротилового эквивалента удельное значение гамма-лучей в определении величины суммарной дозы излучения становится преобладающим.

VIII.82. Следует подчеркнуть, что изложенные выше выводы действительны только для суммарных доз излучения. Расстояния от центра взрыва, на которых эти дозы будут получены, можно определить путем интерполяции кривых, изображенных на рис. VIII.82; эти кривые характеризуют зависимость между суммарной дозой начальной ядерной радиации, мощностью взрыва и расстоянием. Для бóльших значений доз, то есть доз, получаемых на относительно небольших расстояниях от эпицентра взрыва, доля суммарной дозы, обусловленная нейтронами, все больше и больше увеличивается. Характер начальной ядерной радиации

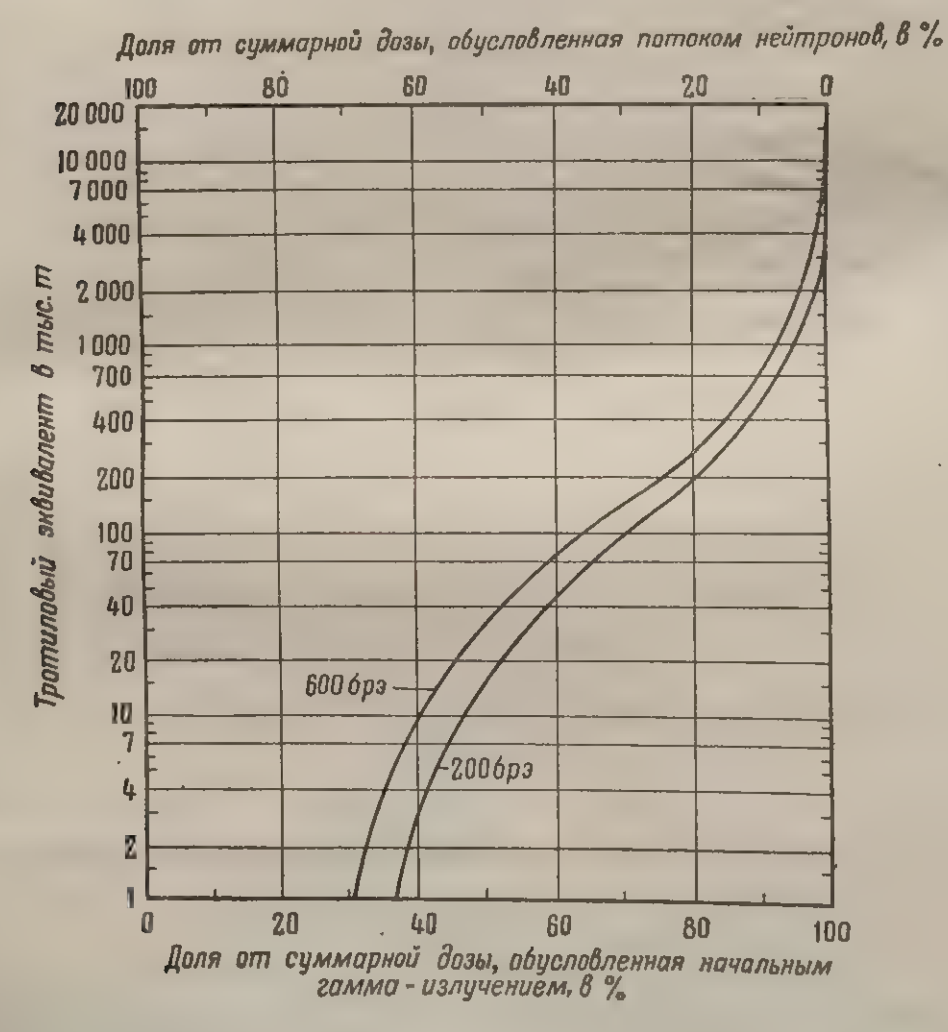


Рис. VIII.81. Относительные доли суммарной биологической дозы, обусловленные нейтронами и начальным гамма-излучением

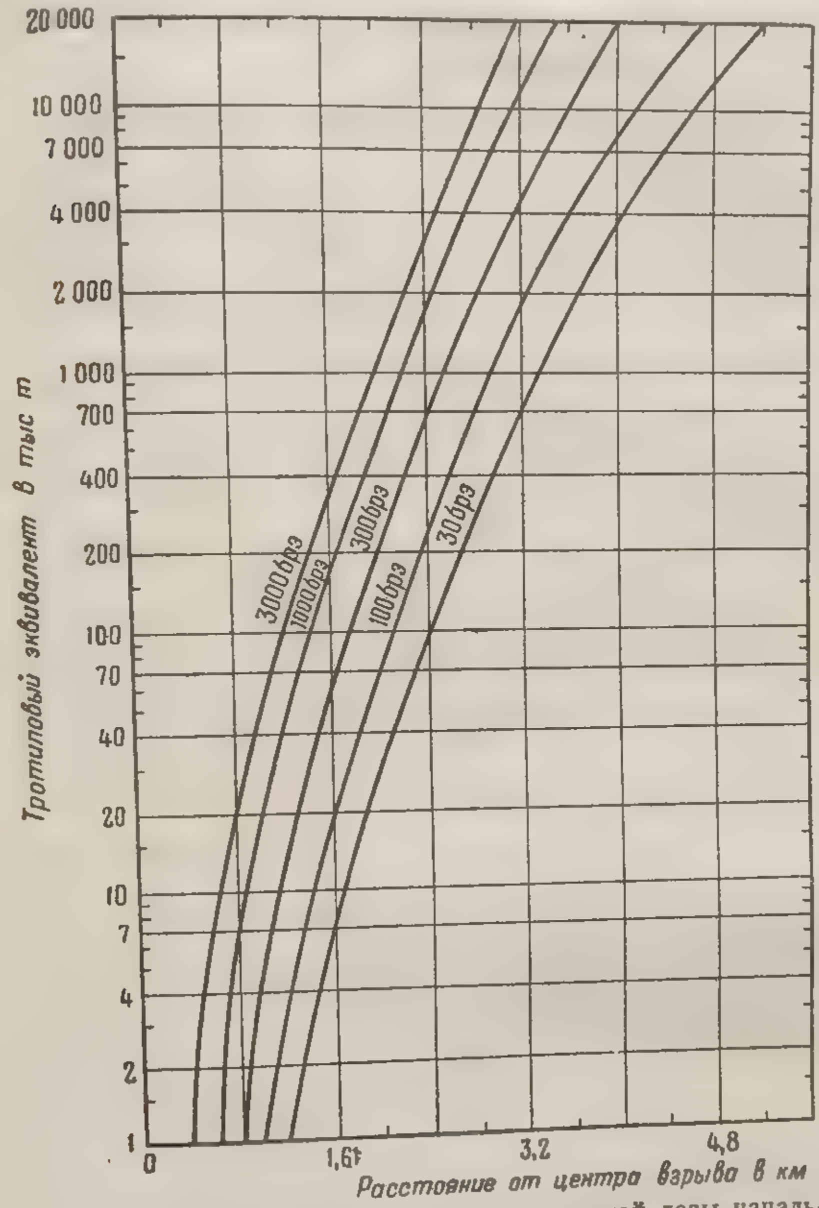


Рис. VIII.82. Зависимость величины суммарной дозы начальной ядерной радиации (гамма-лучи + нейтроны) от тротилового эквивалента и расстояния до центра взрыва

в данном месте определяется, таким образом, мощностью ядерного взрыва и величиной суммарной дозы излучения, полученной в этом месте. Для больших доз и для взрывов с малым значением тротилового эквивалента доля суммарной дозы, обусловленная нейтронами, относительно больше доли, обусловленной гамма-лучами; для средних величин доз или для больших значений тротилового эквивалента справедливо обратное соотношение.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ЯДЕРНОЙ РАДИАЦИИ[1]

Взаимодействие гамма-лучей с веществом

VIII.83. Известны три основных типа взаимодействия гамма-лучей с веществом, в результате которого гамма-лучи рассеиваются и поглощаются. Первый из них называется **комптон-эффектом** (рассеивание). При этом взаимодействии фотон (квант) гамма-излучения сталкивается с одним из электронов атома, в результате чего некоторая часть энергии этого фотона передается электрону. Фотон, потерявший часть своей энергии, изменяет направление своего движения. Это значит, что в результате такого взаимодействия с веществом гамма-лучи подвергаются рассеянию, вследствие чего они теряют свою энергию.

VIII.84. Общая величина потерянной при рассеянии энергии, приходящаяся на один атом вещества, с которым взаимодействуют гамма-лучи, пропорциональна количеству электронов в атоме, т. е. атомному номеру элемента (см. § I.8). Следовательно, величина рассеянной энергии, приходящаяся на один атом, больше для тех элементов, атомный номер которых выше, и меньше для элементов с малыми атомными номерами. Для всех элементов независимо от их атомного номера рассеяние быстро уменьшается с ростом энергии фотонов гамма-излучения.

VIII.85. Вторым типом взаимодействия гамма-лучей с веществом является **фотоэлектрический эффект.** Фотон, имеющий энергию, несколько бóльшую, чем энергия связи электрона в атоме, передает всю свою энергию электрону, который в результате этого вырывается из атома. Поскольку фотон, вызывающий фотоэлектрический эффект, теряет всю свою энергию, он, как таковой, прекращает свое существование. В этом отношении данный процесс и отличается от рассеяния, при котором фотон после взаимодействия с электроном не исчезает, а все еще сохраняется, хотя энергия этого фотона и уменьшается. Потеря энергии фотона гамма-излучения при фотоэлектрическом эффекте, приходящаяся на один атом, так же как и в случае рассеяния, увеличивается с ростом атомного номера элемента, через который проходят гамма-лучи; по мере увеличения энергии фотона эта потерянная энергия очень быстро уменьшается.

VIII.86. Третьим типом взаимодействия гамма-излучения с веществом является процесс **образования пар.** Этот процесс состоит в следующем. При прохождении фотона гамма-излучения, энергия которого превышает 1,02 *Мэв*, вблизи ядра атома может произойти образование из этого фотона пары частиц, а именно позитрона и электрона. Как и в случае фотоэлектрического эффекта, процесс образования пар сопровождается исчезновением фотона гамма-из-

[1] Этот раздел при чтении данной главы может быть опущен.

лучения. Позитрон сразу же после его образования вступает во взаимодействие с электроном, при этом образуются два фотона, энергия которых меньше энергии первоначального фотона. Интенсивность процесса образования пар в пределах одного атома, так же как и интенсивность процессов при других видах взаимодействия, увеличивается с ростом атомного номера элемента; кроме того, образование пар идет более интенсивно с возрастанием энергии фотона (при этом энергия фотона должна быть не менее 1,02 *Мэв*).

VIII.87. Из рассмотрения трех описанных выше типов взаимодействия следует, что во всех случаях интенсивность взаимодействия, отнесенная к одному атому, возрастает с увеличением атомного номера (или атомного веса) вещества, через которое проходят гамма-лучи. Кроме того, каждый акт взаимодействия сопровождается либо полным исчезновением фотона либо уменьшением его энергии. Конечным результатом является некоторое уменьшение интенсивности или мощности дозы гамма-лучей. Так как увеличение атомного веса вещества обычно сопровождается примерно таким же ростом его плотности, то количество атомов в единице объема у разных веществ остается примерно одинаковым. Поэтому данный объем (или толщина) материала, содержащего элементы с большим атомным весом (тяжелые элементы), будет обеспечивать более эффективную защиту от гамма-лучей, чем такой же объем (или толщина) материала, содержащего только элементы с малым атомным весом (легкие элементы). Иллюстрация различия в поведении этих материалов при прохождении через них гамма-лучей будет дана ниже.

VIII.88. Другой важный факт состоит в том, что вероятность как рассеяния, так и фотоэлектрического эффекта (в пределах одного атома) понижается с увеличением энергии фотонов гамма-излучения. Однако вероятность процесса образования пар, который начинается при энергии фотонов, равной 1,02 *Мэв*, увеличивается с ростом энергии фотонов сверх этой величины. Сочетание различных ослабляющих эффектов, из которых два с ростом энергии фотонов уменьшаются, а один увеличивается, означает, что при некоторой энергии фотонов, превышающей 1,02 *Мэв*, поглощение гамма-излучения данным материалом должно быть минимальным. Наличие такого минимума будет показано ниже.

Коэффициенты поглощения гамма-лучей

VIII.89. Если узкий (или коллимированный) пучок гамма-лучей определенной энергии, имеющий интенсивность I_0[1], падает на слой

---

[1] Интенсивность излучения определяется количеством гамма-лучей определенной энергии (монохроматического излучения), которое проходит в единицу времени через единицу площади в данном месте. В основном она пропорциональна мощности дозы. Однако уравнение (VIII.89.1) можно использовать для определения ослабления суммарной (аккумулированной) дозы, полученной на данном расстоянии объектом, находящимся за защитным экраном либо на открытой местности.

материала толщиной x, то интенсивность I лучей после их прохождения через этот слой можно представить в виде уравнения

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \qquad \text{(VIII.89.1)}$$

где μ представляет собой линейный коэффициент поглощения.

Расстояние обычно выражается в сантиметрах, поэтому размерность линейного коэффициента поглощения можно представить в виде $см^{-1}$. Значение коэффициента μ для любого материала и для гамма-лучей определенной энергии пропорционально сумме коэффициентов поглощения, обусловленных рассеянием, фотоэлектрическим поглощением и образованием пар. Из уравнения (VIII.89.1) видно, что для данной толщины слоя материала x интенсивность или доза I проходящих через этот слой гамма-лучей будет тем меньше, чем больше величина μ.

Другими словами, линейный коэффициент поглощения любого материала служит мерой защитной способности слоя этого материала определенной толщины, например одного сантиметра, одного метра и т. д. (в зависимости от размерности μ).

VIII.90. Значение μ при любых заданных условиях может быть рассчитано при помощи уравнения (VIII.89.1) путем определения интенсивности или дозы гамма-лучей до (I_0) и после (I) прохождения излучения через слой материала известной толщины x. Некоторые данные, определенные таким путем для гамма-лучей с энергией от 0,5 до 10 *Мэв*, представлены в табл. VIII.90. В этой таблице данные, относящиеся к бетону, даются для обычного бетона с плотностью 2,3 $г/см^3$. Для специального тяжелого бетона, содержащего железо, окислы железа и бариты, значение коэффициентов увеличивается приблизительно пропорционально плотности.

Таблица VIII.90

Значение линейных коэффициентов поглощения для гамма-лучей

Энергия гамма-лучей, *Мэв*	Линейный коэффициент поглощения (μ), $см^{-1}$				
	воздух	вода	бетон	железо	свинец
0,5	$1{,}11 \times 10^{-4}$	0,097	0,22	0,66	1,7
1,0	$0{,}81 \times 10^{-4}$	0,071	0,15	0,47	0,80
2,0	$0{,}57 \times 10^{-4}$	0,049	0,11	0,33	0,52
3,0	$0{,}46 \times 10^{-4}$	0,040	0,088	0,28	0,47
4,0	$0{,}41 \times 10^{-4}$	0,034	0,078	0,26	0,47
5,0	$0{,}35 \times 10^{-4}$	0,030	0,071	0,25	0,50
10	$0{,}26 \times 10^{-4}$	0,022	0,060	0,23	0,61

VIII.91. Путем соответствующих измерений и теоретических расчетов можно определить значения отдельных слагаемых, определяющих полную величину линейного коэффициента поглощения ($\mu_{полн}$); эти отдельные слагаемые обусловлены рассеянием ($\mu_{рас}$),

фотоэлектрическим поглощением ($\mu_{ф.э}$) и процессом образования пар ($\mu_{пар}$). Кривые, характеризующие изменение общего линейного коэффициента поглощения и отдельных его слагаемых для свинца, типичного тяжелого элемента (с большим атомным весом), обладающего большим коэффициентом поглощения, приведены на рис. VIII.91а. Такие же кривые, полученные для воздуха, пред-

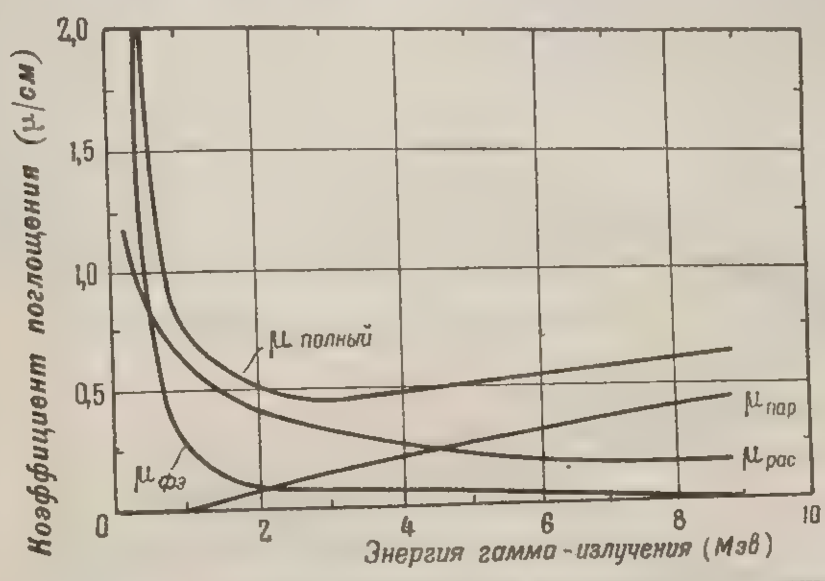


Рис. VIII.91а. Зависимость линейного коэффициента поглощения и его составляющих от энергии гамма-лучей (для свинца)

ставляющего собой смесь легких элементов (с небольшим атомным весом) и обладающего небольшим коэффициентом поглощения, показаны на рис. VIII.91б. Из этих графиков видно, что во всех случаях при малых энергиях гамма-лучей величина линейного коэффициента поглощения с ростом энергии гамма-фотонов уменьшается. Это обусловлено, как указывалось выше, комптоновским рассеянием и фотоэлектрическим поглощением. При увеличении энергии фотонов сверх 1,02 *Мэв* начинает играть все более заметную роль процесс образования пар. Поэтому с увеличением энергии гамма-излучения значение коэффициента ослабления проходит через минимум и при достаточно большой энергии фотонов значение этого коэффициента начинает увеличиваться. Это видно из рис. VIII.91а, а также из данных последней графы табл. VIII.90 (данные для свинца). Для элементов с меньшими атомными весами увеличение коэффициента поглощения начинается лишь тогда, когда энергия гамма-фотонов достигает очень высоких значений, например для бетона — около 17 *Мэв* и для воды — около 50 *Мэв*.

VIII.92. Тот факт, что по мере увеличения энергии гамма-лучей линейный коэффициент поглощения уменьшается и может пройти через минимум, имеет важное значение при решении проблемы защиты. Например, защитный экран, предназначенный для ослабле-

ния гамма-лучей с энергией 1 *Мэв*, будет вследствие меньшего значения линейного коэффициента поглощения значительно менее эффективным при ослаблении гамма-излучений с энергией 10 *Мэв*. Это положение остается справедливым независимо от материала, из которого изготовлен защитный экран. Гамма-лучи начальной радиации ядерного взрыва имеют широкий диапазон энергии, вплоть до 10 *Мэв* и выше. Однако с целью проведения приближенных рас-

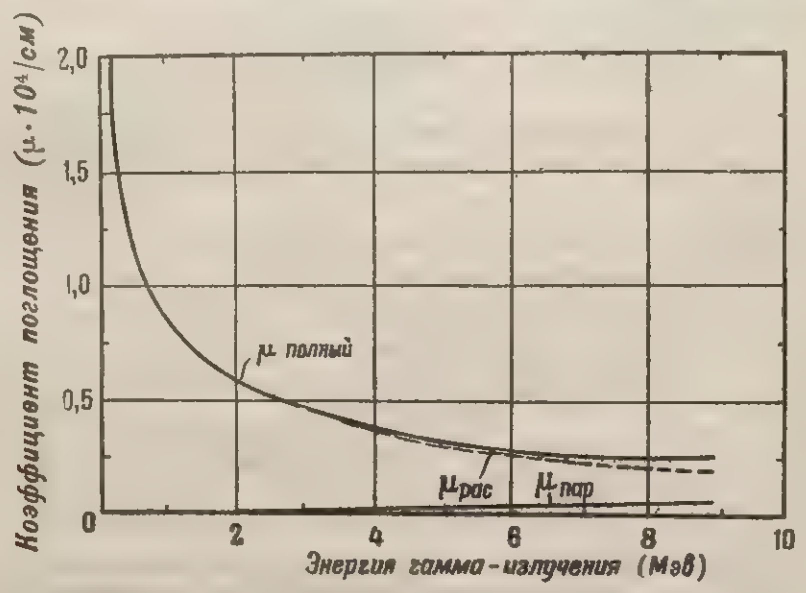


Рис. VIII. 91б. Зависимость линейного коэффициента поглощения и его составляющих от энергии гамма-лучей (для воздуха)

четов толщин защитных экранов эмпирическое (или эффективное) значение энергии фотонов гамма-излучения, равное 4,5 *Мэв*, дает, по-видимому, вполне удовлетворительные результаты (это значение, как будет показано в главе IX, не применимо к остаточному ядерному излучению).

VIII.93. Из данных, приведенных в табл. VIII.90, следует, что для любой заданной величины энергии гамма-лучей значения линейных коэффициентов поглощения возрастают слева направо, т. е. увеличиваются с ростом плотности вещества. Следовательно, слой плотного материала данной толщины будет ослаблять гамма-излучение в большей степени, чем слой материала такой же толщины, но менее плотный (см. § VIII.41).

Массовый коэффициент поглощения

VIII.94. Было установлено, что в первом приближении линейный коэффициент поглощения для гамма-лучей с данной энергией пропорционален плотности поглощающего (экранирующего) мате-

риала. Это значит, что отношение линейного коэффициента поглощения данного материала к его плотности, называемое **массовым коэффициентом поглощения**, при данной энергии гамма-лучей остается примерно одинаковым для всех веществ. Это положение особенно справедливо для элементов с небольшим и средним атомным весом (включая железо, атомный вес которого равен 56) и при энергии гамма-лучей порядка нескольких миллионов электрон-вольт. При этих условиях величина коэффициента поглощения определяется в основном величиной коэффициента комптоновского рассеяния (см. рис. VIII.91б). Эффективный массовый коэффициент поглощения гамма-лучей начальной радиации для воды, бетона, грунта и железа равен примерно 0,021, при этом плотность выражается в граммах на кубический сантиметр[1].

VIII.95. Обозначив плотность экранирующего материала через ρ, уравнение (VIII.89.1) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{I_0}{I} = e^{\mu x} = e^{(\mu/\rho)(\rho x)}, \qquad \text{(VIII.95.1)}$$

где $\frac{I_0}{I}$ — степень поглощения (см. § VIII.46) гамма-лучей защитным экраном толщиной *x см*;

$\frac{\mu}{\rho}$ — массовый коэффициент поглощения.

Приняв для гамма-лучей начальной радиации $\frac{\mu}{\rho}$ равным 0,021, получаем следующее выражение для определения степени поглощения:

$$\frac{I_0}{I} = e^{0,021\rho x}.$$

Пользуясь приведенным выше выражением, можно с достаточной точностью рассчитать степень ослабления гамма-лучей экраном из любого материала, если известны его плотность и толщина, а также при условии, что этот материал состоит из элементов с небольшим или средним атомным весом.

Толщины слоев половинного и десятикратного ослабления

VIII.96. Слой половинного ослабления согласно определению, данному в § VIII.42, представляет собой слой любого материала такой толщины, при которой данное (монохроматическое) гамма-

---

[1] Указанное значение эффективного массового коэффициента поглощения является приемлемым, поскольку при таком значении его возможно применить для расчета защитных экранов большой толщины при широких пучках излучения (см. § VIII.99 и далее).

излучение ослабляется в два раза. Таким образом, подставляя в уравнение (VIII.89.1) отношение $\frac{I}{I_0}$, равное $^1/_2$, получим

$$e^{-\mu x_{1/2}} = \frac{1}{2}, \qquad \text{(VIII.96.1)}$$

где $x_{1/2}$ — толщина слоя половинного ослабления в сантиметрах.

Пользуясь уравнением (VIII.96.1), легко показать, что

$$x_{1/2} = \frac{0{,}693}{\mu}. \qquad \text{(VIII.96.2)}$$

Следовательно, толщина слоя половинного ослабления гамма-лучей с данной энергией является величиной, обратно пропорциональной линейному коэффициенту ослабления данного материала. Очевидно, что эта величина не зависит от интенсивности (или дозы) излучения.

VIII.97. Приняв значение массового коэффициента ослабления $\frac{\mu}{\rho}$ для начальных гамма-лучей за постоянную величину, равную 0,021, из уравнения (VIII.96.2) находим, что

$$x_{1/2} = \frac{0{,}693}{0{,}021} = \frac{33}{\rho}\ \text{см},$$

где $x_{1/2}$ измеряется в сантиметрах, а плотность ρ в граммах на кубический сантиметр.

По данным табл. VIII.44 плотность обычного бетона составляет 2,3 *г/см*³, толщина слоя половинного ослабления равняется примерно 15 *см*.

VIII.98. Для слоя десятикратного ослабления отношение $\frac{I}{I_0} = 0{,}1$; тогда выражение для определения толщины $x_{0,1}$, полученное из уравнения (VIII.89.1), можно записать в следующем виде:

$$x_{0,1} = \frac{2{,}30}{\mu}\ \text{см},$$

и применительно к гамма-лучам начальной радиации выражение для определения толщины слоя десятикратного ослабления приобретает вид

$$x_{0,1} = \frac{110}{\rho}\ \text{см}.$$

Для бетона толщина слоя десятикратного ослабления равна, таким образом, 48 *см*.

Толстые защитные экраны. Коэффициент возрастания

VIII.99. Уравнение (VIII.89.1), строго говоря, применимо лишь к случаям, когда фотоны, рассеиваемые в результате комптоновского взаимодействия, можно было бы считать полностью удаляющимися из пучка гамма-лучей. Такое положение действительно имеет место для узких пучков или для защитных экранов средней толщины; однако это положение теряет свою силу для широких пучков гамма-лучей и для защитных экранов большой толщины. В последних случаях фотон, перед тем как пройти сквозь защитный экран, может претерпеть многократное рассеяние Для широких пучков излучения и толстых экранов, представляющих интерес с точки зрения защиты от ядерных взрывов, величина интенсивности (или дозы) излучения I, проходящего через экран, получается больше величины,вытекающей из уравнения (VIII.89.1). Учет влияния многократного рассеяния излучений осуществляют путем введения в это уравнение так называемого «коэффициента возрастания», обозначаемого через $B\ (x)$, величина которого зависит от толщины защитного экрана. Таким образом, уравнение (VIII.89.1) можно записать в виде

$$I = I_0 B(x)\, e^{-\mu x}. \qquad \text{(VIII.99.1)}$$

VIII.100. Величина коэффициента возрастания была определена для целого ряда элементов на основании теоретических соображений. Кривые зависимости коэффициента возрастания от атомного номера и толщины слоя поглощающего материала для монохроматических гамма-лучей с энергией 4 *Мэв* и 1 *Мэв* приведены соответственно на рис. VIII.100а и б. На этих кривых толщина слоя поглощающего материала выражается в единицах μx, т. е. через число длин релаксации (см. § VIII.104). Численные значения коэффициентов возрастания, приведенные на рис. VIII.100а, можно с достаточной для практики точностью применять для оценки ослабления начального гамма-излучения, а данные, приведенные на рис. VIII.100б, можно использовать для расчета толщин защитных экранов, предназначенных для ослабления остаточной ядерной радиации (см. гл. IX).

VIII.101. Из приведенного выше рассуждения видно, что понятие «слой половинного (десятикратного) ослабления» применимо только к монохроматическим излучениям и тонким защитным экранам, для которых коэффициент возрастания равен единице. Однако, если принять массовый коэффициент поглощения гамма-лучей начальной радиации равным 0,021 (см. § VIII.94), то этим самым приближенно учитывается, с одной стороны, полихроматическая природа гамма-излучения, испускаемого при ядерном взрыве, а с другой — коэффициент возрастания, обусловленный многократным рассеянием фотонов. Следовательно, выражения, приведенные в § VIII.96 и § VIII.98, позволяющие определять толщины слоя

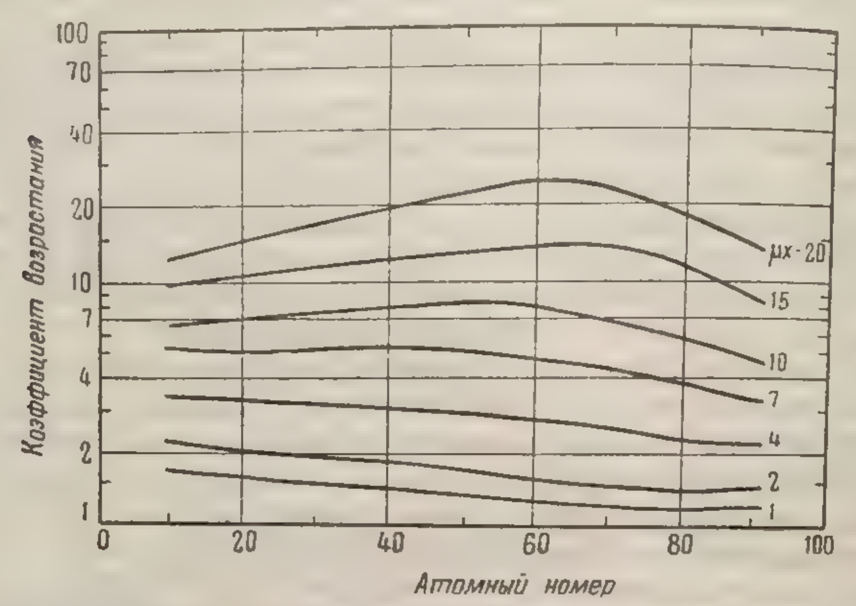


Рис. VIII.100а. Зависимость коэффициента возрастания от атомного номера для начального гамма-излучения с энергией фотонов 4 *Мэв*

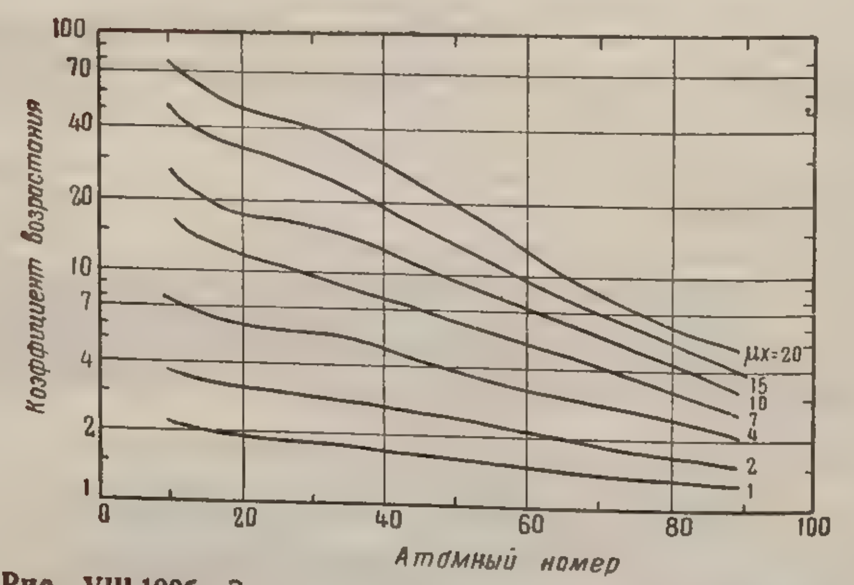


Рис. VIII.100б. Зависимость коэффициента возрастания от атомного номера для остаточного гамма-излучения с энергией фотонов 1 *Мэв*

половинного и десятикратного ослабления, остаются справедливыми для практических расчетов степени ослабления гамма-лучей начальной радиации защитными экранами с большой толщиной.

Распространение гамма-лучей от источника

VIII.102. При изложении предыдущего раздела не учитывалась ни природа источника гамма-лучей, например, ядерного взрыва, ни расстояние от него. В этом разделе рассматривалось лишь соотношение между интенсивностью излучения, падающего на слой защитного материала той или иной толщины, предназначенный для ослабления излучения, и интенсивностью (или дозой) лучей, проходящих через этот защитный слой. Для установления связи между значением дозы падающего излучения, которая определяется величиной I_0, и характеристиками источника гамма-лучей, например, ядерного взрыва, необходимо учитывать, что с увеличением расстояния от источника излучения величина дозы гамма-лучей уменьшается пропорционально квадрату этого расстояния (вследствие распределения излучения на все большей площади) и что ослабление излучений, кроме того, будет вызываться их рассеянием и поглощением в атмосфере. Процесс рассеяния и поглощения излучений в атмосфере в принципе, однако, не отличается от процесса, рассмотренного выше в связи с проблемой защитного экранирования.

VIII.103. Вследствие того, что расстояния, на которых требуется производить оценку дозы ядерного излучения, обычно значительно превосходят размеры взорвавшейся бомбы, последнюю можно считать точечным источником, испускающим в общей сложности R_γ начального гамма-излучения, выраженного в соответствующих единицах. Следовательно, на расстоянии D от точки взрыва количество начальных гамма-лучей, приходящееся на единицу площади, составит $\frac{R_\gamma}{4\pi D^2}$. При этом не учитываются потери излучений, обусловленные их рассеянием и поглощением в воздухе. Эти потери можно учесть при помощи уравнения (VIII.99.1), так как для представляющих интерес расстояний коэффициент возрастания значительно больше единицы. Однако проще воспользоваться уравнением (VIII.89.1) и подобрать коэффициент поглощения таким образом, чтобы он соответствовал получающимся на практике результатам измерений. Это приводит к тому, что I_0, представляющее собой дозу начального гамма-излучения, может быть выражено (приближенно) следующим уравнением:

$$I_0 = \frac{R_\gamma}{4\pi D^2} e^{-\mu D}, \qquad \text{(VIII.103.1)}$$

где μ — коэффициент, который не может применяться к излучению с любой заданной энергией, а скорее представляет собой среднюю

эмпирическую величину для гамма-фотонов, обладающих различными энергиями, характерными для начальной радиации ядерного взрыва.

VIII.104. По различным причинам μ удобнее заменить выражением $1/\lambda$, где λ — величина, называемая **длиной релаксации** гамма-фотонов. Эта величина выбрана с целью облегчения практических расчетов и представляет собой толщину слоя материала, например воздуха, необходимую для ослабления излучения в «e» раз, где e — основание натуральных логарифмов. Таким образом, уравнение (VIII.103.1) можно записать в следующем виде:

$$I_0 = \frac{R_\gamma}{4\pi D^2} e^{-D/\lambda}, \qquad \text{(VIII.104.1)}$$

где I_0 — доза гамма-излучения, полученная на расстоянии D от центра взрыва при отсутствии защитного экрана.

Из графика, изображенного на рис. VIII.35а, можно получить фактические значения I_0, выраженные в рентгенах, для различных расстояний от центра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*.

VIII.105. Преобразовав уравнение (VIII.104.1) таким образом, чтобы его левая часть имела вид I_0D^2, и прологарифмировав это выражение, находим, что

$$\lg I_0D^2 = \text{const} - 0{,}4343\frac{D}{\lambda}.$$

Это означает, что если величину I_0D^2 отложить на оси графика в логарифмическом масштабе, а расстояние D — в линейном масштабе, то графическое изображение этой зависимости должно представлять собой прямую линию. По величине тангенса угла наклона этой прямой, который равен 0,4343, может быть легко рассчитана длина релаксации гамма-лучей. Пример такого графика, построенного на основе данных, представленных на рис. VIII.35а, для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, показан на рис. VIII.105. Из этого графика находим, что величина λ составляет 310 *м*, а по отрезку, отсекаемому этой прямой на вертикальной оси, находим, что $\frac{R_\gamma}{4\pi} = 1{,}15 \cdot 10^9 \frac{р}{м^2}$. Тогда уравнение (VIII.104.1), представляющее изменение дозы в рентгенах (или биологических рентген-эквивалентах), в зависимости от расстояния D, измеренного в метрах, приобретает вид

$$I_0 = \frac{1{,}15 \times 10^9}{D^2} e^{-D/310} \ р/\text{тыс. } т.$$

Это выражение справедливо для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*.

VIII.106. Если общая доза начального гамма-излучения пропорциональна тротиловому эквиваленту и если принять, что длина релаксации фотонов в воздухе является постоянной, то величину

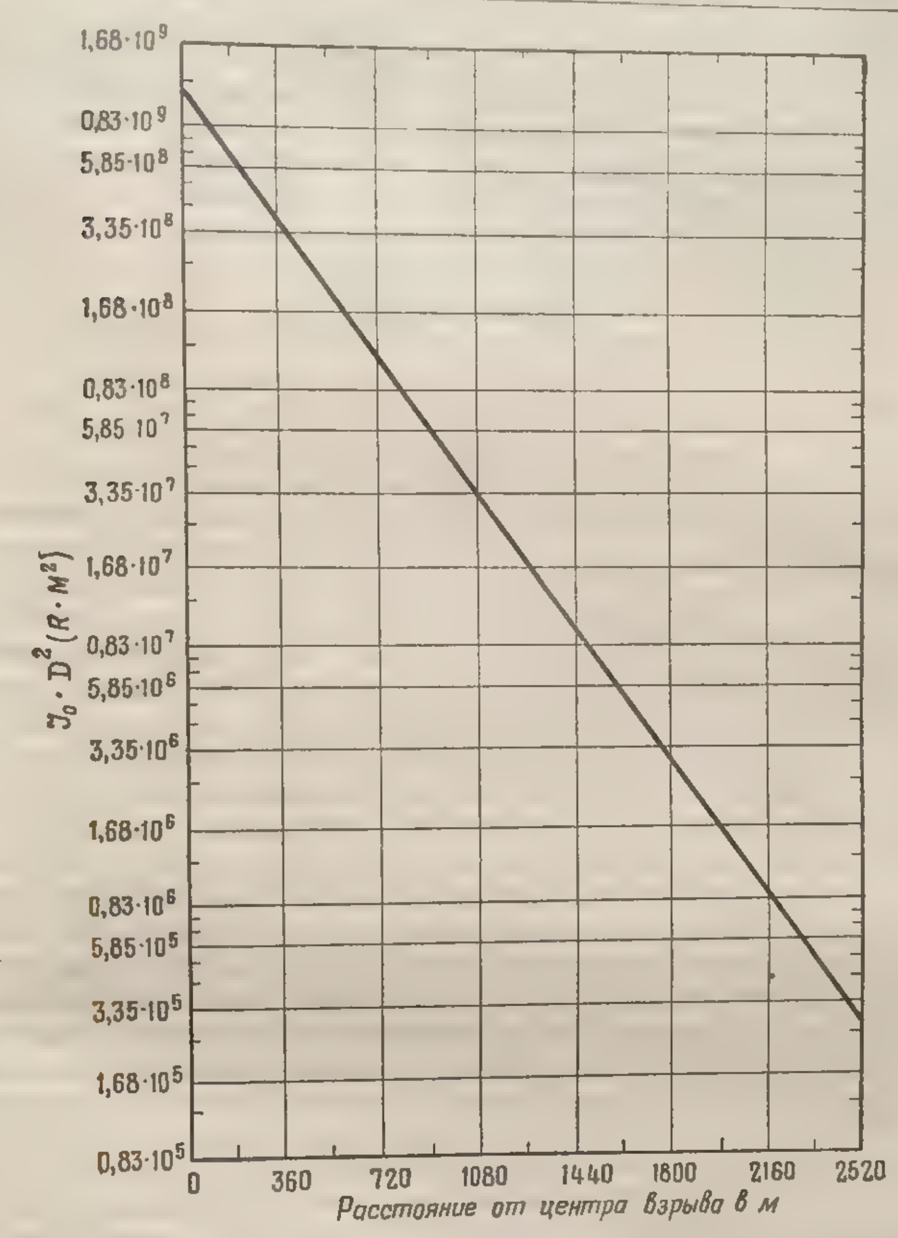


Рис. VIII.105. Зависимость между произведением I_0D^2 (I_0 — доза начального гамма-излучения; D — расстояние от центра взрыва) и расстоянием D при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

дозы, полученной при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*, можно определить путем умножения приведенного выше уравнения на W. Однако, вследствие того что во время распространения запаздывающей части начальных гамма-лучей наблюдается понижение давления воздуха, а также по другим причинам, о которых говорилось в § VIII.38, величина λ для тротиловых эквивалентов, превышающих 20 тыс. *т*, фактически больше 310 *м* и изменяется в зависимости от значения тротилового эквивалента

взрыва. Однако вместо того, чтобы каждый раз подбирать необходимое значение λ, проще вместо W (фактическое значение тротилового эквивалента) подставить значение коэффициента пересчета W', определяемое из рис. VIII.35б. В таком случае общее уравнение для расчета величины дозы начального гамма-излучения на расстоянии D от места взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W тыс. *т* приобретает вид

$$I_0 = \frac{1{,}15 \times 10^9\, W'}{D^2}\, e^{-D/310}\ p.$$

Энергетический спектр нейтронов

VIII.107. Энергия нейтронов, достигающих данного расстояния от точки ядерного взрыва, весьма различна и колеблется от нескольких миллионов до долей электрон-вольта. Определение полного энергетического спектра нейтронов аналитическим путем или путем эксперимента практически невозможно. Поэтому для разрешения этой проблемы поступают следующим образом. Нейтроны подразделяют по энергиям на несколько диапазонов. Для каждого энергетического диапазона измеряют интенсивность нейтронного потока. По результатам этих измерений можно составить общее представление о полном энергетическом спектре нейтронов.

VIII.108. Измерения такого рода осуществляются при помощи пороговых детекторов в виде фольги активизирующихся или делящихся под действием нейтронов веществ (см. § VIII.66 и VIII.67). Например, наведенная радиоактивность серы вызывается захватом нейтронов, энергия которых превышает 2,5 *Мэв*; в случае если энергия нейтронов меньше этого значения, образование наведенной радиоактивности не происходит. Следовательно, степень активации серосодержащей фольги может служить мерой интенсивности нейтронов, обладающих энергией, превышающей 2,5 *Мэв*. Точно так же для интенсивного деления урана-238 необходимо воздействие нейтронов, обладающих энергией в 1,5 *Мэв* или более; это означает, что по активности образующихся при делении урана-238 продуктов можно определить интенсивность только тех нейтронов, энергия которых превышает 1,5 *Мэв*. Разница между результатами воздействия нейтронов на фольгу, содержащую серу и уран-238, определяет интенсивность нейтронов, имеющих энергию в пределах от 1,5 до 2,5 *Мэв*. Другими материалами, которые используются таким же образом, являются нептуний-237 (для деления которого необходимо воздействие нейтронов с энергией не менее 0,7 *Мэв*), экранированный бором плутоний-239, деление которого вызывается нейтронами с энергией не менее 100 *эв*, и золото, которое активируется медленными нейтронами.

VIII.109. Результаты ряда измерений, произведенных на различных расстояниях от центра опытного ядерного взрыва, показаны на

рис. VIII.109; на этом графике дана зависимость произведения ND^2, отложенного по вертикальной оси в логарифмическом масштабе от расстояния D, отложенного по горизонтальной оси в линейном масштабе. В данном случае N представляет собой количество нейтронов, приходящихся на 1 $см^2$ и вызывающих деление или активацию соответствующих веществ в фольге на расстоянии D от центра взрыва. Так как для данной цели необязательно иметь действительные значения величины ND^2, то на приведенном графике даются относительные значения этой величины.

VIII.110. На рис. VIII.109 видно, что различные прямые линии, как и следовало ожидать, имеют наклон в правую сторону; это свидетельствует о том, что интенсивности нейтронов, обладающих различными энергиями, с увеличением расстояния от центра взрыва непрерывно уменьшаются. Однако наиболее важным фактом является то, что все линии на графике остаются параллельными друг другу. Следовательно, хотя общее количество нейтронов, приходящихся на один квадратный сантиметр, и уменьшается с ростом расстояния, однако при этом на всем протяжении от места взрыва сохраняется пропорциональность между количествами нейтронов, обладающих данным значением энергии. Другими словами, на протяжении довольно значительных расстояний от места взрыва наблюдается равновесный нейтронный спектр; это означает, что распределение нейтронов по энергиям в составе начального ядерного излучения не зависит от удаления данной точки от центра взрыва.

VIII.111. Из этого заключения следует одно важное следствие, которое состоит в том, что если эти результаты являются справедливыми для любого случая, то нейтроны можно рассматривать в виде единой группы с определенным распределением энергии независимо от конкретного расстояния от места взрыва. Таким образом, наличие равновесного спектра позволяет сделать вывод о том, что определение при помощи пороговых детекторов нейтронного спектра в одном каком-нибудь месте является достаточным, чтобы определить общую дозу нейтронов на любом заданном расстоянии от места взрыва. Кроме того, аналитическое выражение для определения дозы нейтронов в зависимости от расстояния получается более простым.

VIII.112. Что касается энергетического спектра нейтронов, то следует отметить, что медленные нейтроны, энергия которых меньше 1 *эв*, обусловливают не более 2% от общей дозы, создаваемой нейтронами на всех расстояниях, представляющих практический интерес. Поэтому в большинстве случаев поражающим действием тепловых нейтронов можно пренебречь. Примерно 75% дозы, создаваемой нейтронами, приходится на долю быстрых нейтронов, энергия которых превышает 0,75 *Мэв*[1].

[1] Большая часть нейтронов, образующихся в процессе деления, обладает энергией от 1 до 3 *Мэв*. Нейтроны, образующиеся при реакции синтеза между дейтерием и тритием, имеют энергию 14 *Мэв*.

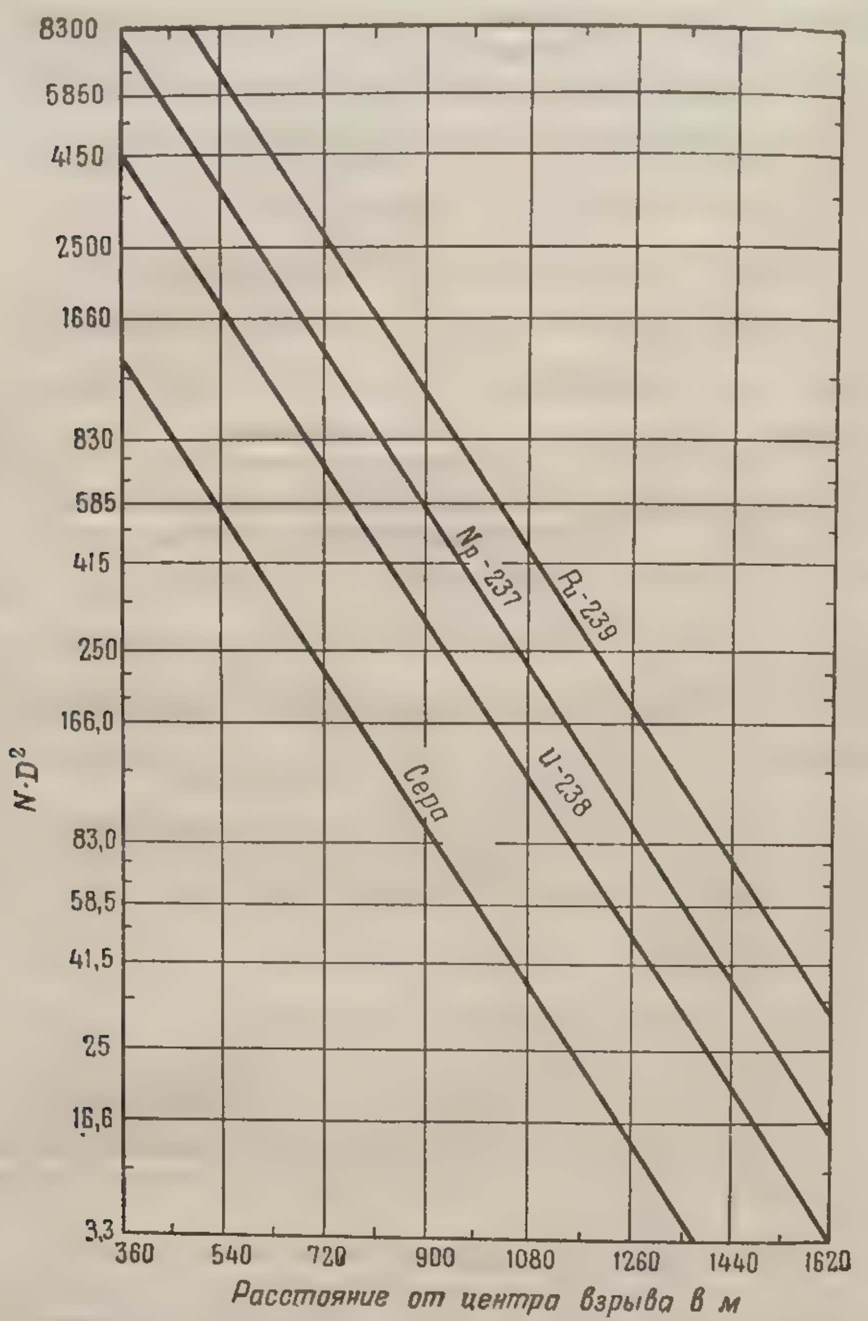


Рис. VIII.109. Зависимость произведения ND^2 от расстояния D до центра взрыва (для быстрых нейтронов, распространяющихся в воздухе), выведенная по результатам измерений при помощи пороговых детекторов

Распространение нейтронов от источника

VIII.113. Распространение нейтронов в воздухе от взорвавшейся ядерной бомбы, рассматриваемой в виде точечного источника, можно представить точно таким же образом, как это было сделано ранее для гамма-лучей. Если N_0 — общая доза нейтронов, полученная на расстоянии D от центра взрыва, то по аналогии с уравнением (VIII.104.1) получим

$$N_0 = \frac{R_n}{4\pi D^2} e^{-D/\lambda_n}, \qquad \text{(VIII.113.1)}$$

где R_n — доза нейтронов, зависящая от величины тротилового эквивалента;

λ — длина релаксации нейтронов в воздухе.

Поскольку спектр нейтронов, образующихся при взрыве ядерной бомбы, по существу, не зависит от расстояния, то λ_n имеет одно значение, которое является усредненным для нейтронов всех энергий. Это значение эквивалентно расстоянию, при прохождении которого общая эффективная доза нейтронов в воздухе уменьшается в «*e*» раз.

VIII.114. Преобразовав уравнение (VIII.113.1) и прологарифмировав его подобно тому, как это было сделано в § VIII.105, получаем

$$\lg N_0 D^2 = \text{const} - 0{,}4343 \frac{D}{\lambda_n}.$$

Из этого выражения следует, что график зависимости N_0D^2 от D, построенный в полулогарифмическом масштабе (рис. VIII.114), должен представлять собой прямую линию. Для построения этого графика были использованы данные рис. VIII.81. По величине тангенса угла наклона прямой линии можно определить, что λ равняется 220 *м*, а по величине отрезка, отсекаемого этой прямой на оси ординат, можно определить значение $\frac{R_n}{4\pi}$, которое для тротилового эквивалента 1 тыс. *т* оказывается равным $6{,}9 \cdot 10^9$ *брэ м²*. Следовательно, предполагая, что доза нейтронов прямо пропорциональна мощности взрыва, хотя такое предположение и не совсем точно (см. § VIII.71), получим, что

$$N_0 = \frac{6{,}9 \times 10^9\, W}{D^2} e^{-D/220} \text{ брэ},$$

где W — тротиловый эквивалент в тыс. *т*;

D — расстояние от точки взрыва в метрах.

VIII.115. Поскольку длина релаксации гамма-лучей и нейтронов начальной радиации составляет соответственно 310 и 220 *м*, то очевидно, что при взрыве ядерной бомбы нейтроны распространяются в воздухе в среднем на меньшее расстояние, чем начальные гамма-

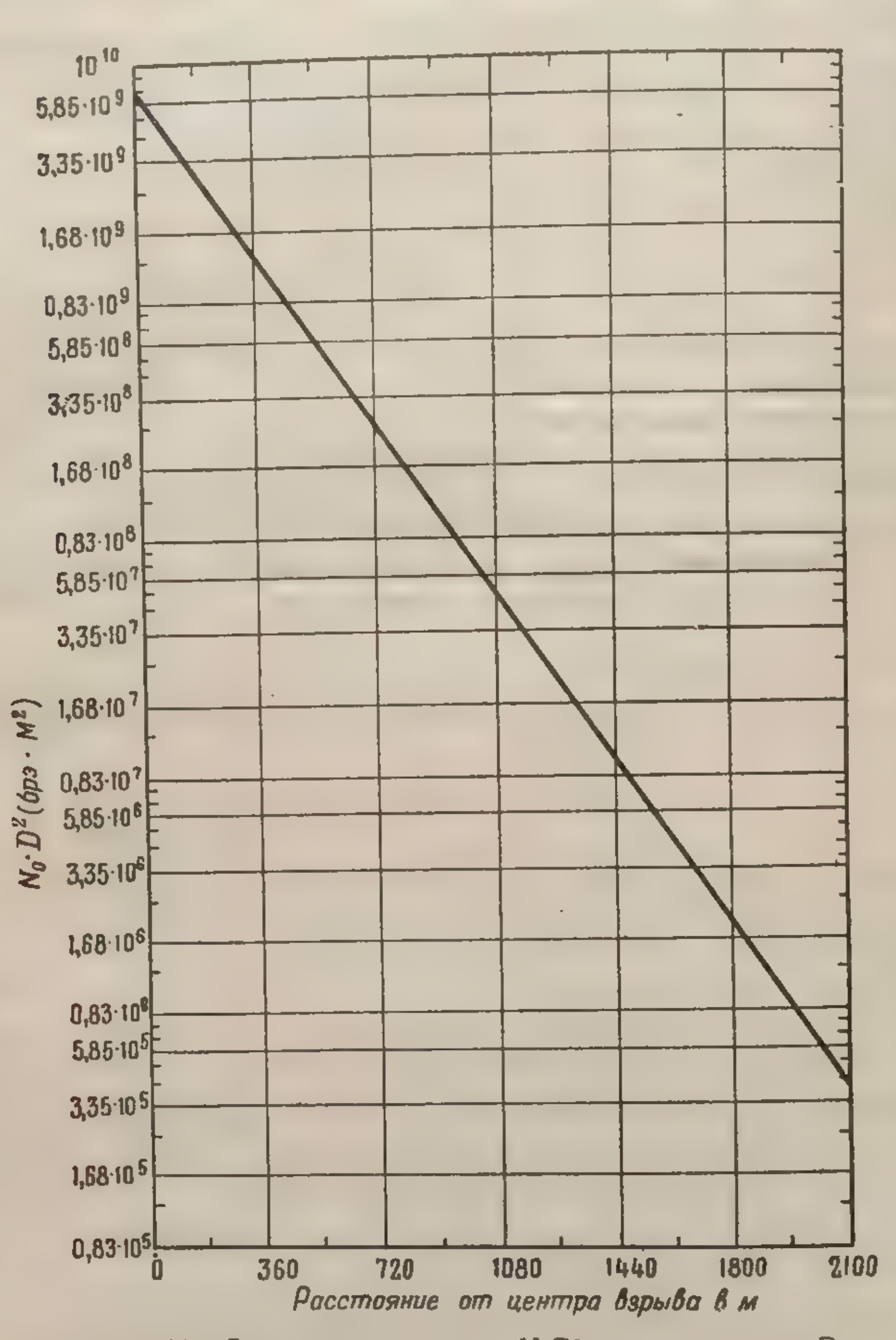


Рис. VIII.114. Зависимость между N_0D^2 и расстоянием D от центра взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*

лучи; при этом в обоих случаях имеется в виду одинаковая степень ослабления как нейтронов, так и гамма-лучей. Значение длины релаксации гамма-лучей и нейтронов является физической основой факта, рассмотренного в § VIII.80, согласно которому с увеличением расстояния от точки взрыва доза нейтронов уменьшается быстрее, чем доза гамма-лучей.

Защита от нейтронов

VIII.116. Ослабление узкого потока нейтронов защитным экраном может быть представлено в виде уравнения, аналогичного уравнению, выведенному для определения ослабления гамма-лучей, а именно:

$$N = N_0 e^{-\Sigma x},$$

где N_0 — доза, получаемая при отсутствии защитного экрана;
N — доза излучения, прошедшего через защитный экран толщиной *x см*.

Символ Σ представляет макроскопическое поперечное сечение захвата, эквивалентное линейному коэффициенту поглощения гамма-лучей. Фактически для любой данной энергии нейтронов и для каждого типа реакции, в которую эти нейтроны вступают, существует различное значение Σ. Однако для расчетов толщин защитных экранов применяется эмпирическое значение, основанное на опытных данных. Это значение является средней величиной и определяется всеми возможными взаимодействиями, характерными для нейтронов с различной энергией, образующихся при ядерном взрыве. Некоторые приближенные значения Σ для быстрых нейтронов приведены в табл. VIII.116; они являются справедливыми для широких пучков потока нейтронов и для защитных экранов большой толщины.

Таблица VIII.116

Эмпирические значения макроскопических поперечных сечений захвата для быстрых нейтронов

Материал	Макроскопическое поперечное сечение захвата Σ в $см^{-1}$
Вода	0,1
Бетон	0,09
Железобетон	0,16

VIII.117. Относительно большое макроскопическое поперечное сечение захвата означает, что слой одного материала меньшей толщины будет так же эффективен, как и слой другого материала

бóльшей толщины, если поперечное сечение захвата последнего будет меньше. Таким образом, бетон, содержащий железо, является более эффективным, чем обычный бетон (см. § VIII.76). Однако необходимо указать на отсутствие простого соотношения, устанавливающего достаточно точную связь между степенью ослабления нейтронов и плотностью материала, подобного соотношению, которое приводилось для гамма-лучей. В заключение следует подчеркнуть, что защитный экран, как отмечалось в § VIII.74, должен не только ослаблять быстрые нейтроны, но он должен обладать также способностью захватывать замедленные нейтроны и поглощать любое гамма-излучение, сопровождающее процесс захвата.

ГЛАВА IX

ОСТАТОЧНАЯ ЯДЕРНАЯ РАДИАЦИЯ И ВЫПАДЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ПРОДУКТОВ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

ИСТОЧНИКИ ОСТАТОЧНОЙ РАДИАЦИИ

Введение

IX.1. Остаточная ядерная радиация определяется (обоснование этому было дано ранее) как излучение, испускаемое спустя одну минуту после момента ядерного взрыва. Это излучение обусловливается радиоактивными остатками бомбы, главным образом продуктами деления и в меньшей степени неразделившимся ураном и плутонием. Кроме того, остатки бомбы обычно содержат некоторые радиоактивные изотопы, образующиеся в результате захвата нейтронов материалами, из которых состоит бомба (см. § VIII.8). Другим источником остаточного ядерного излучения является наведенная радиоактивность, обусловленная захватом нейтронов различными элементами, которые входят в состав грунта, воды или окружающей среды, где протекает взрыв. Попутно можно отметить, что радиоактивность, наведенная гамма-лучами, образующимися при ядерном взрыве, либо незначительна, либо совершенно отсутствует.

IX.2. При воздушном взрыве, особенно в том случае, когда огненный шар образуется высоко над поверхностью земли, может быть проведено довольно четкое разграничение между начальной радиацией, рассмотренной в предыдущей главе, и остаточной ядерной радиацией, которой посвящена настоящая глава.

Такое разграничение возможно потому, что к концу первой минуты после взрыва почти все радиоактивные продукты взрыва ядерной бомбы в форме очень маленьких частичек поднимаются на такую высоту, с которой ядерные излучения больше не в состоянии достигать поверхности земли в сколько-нибудь значительных количествах. Впоследствии эти мельчайшие частицы сильно рассеиваются в атмосфере и очень медленно выпадают на землю.

IX.3. При наземном (надводном) и особенно при подземном (подводном) взрывах осуществить более или менее четкое разграничение между начальным и остаточным ядерным излучениями невозможно. Некоторые излучения, испускаемые радиоактивными

продуктами взрыва, будут оказывать поражающее действие продолжительное время; в этом случае наблюдается смешанное воздействие начального и остаточного излучений. При очень глубоких подземном и подводном взрывах начальными гамма-лучами и нейтронами, образующимися в процессе деления, можно пренебречь. Единственным, имеющим существенное значение ядерным излучением является излучение, обусловленное наличием радиоактивных остатков бомбы. Ядерная радиация в данном случае может, следовательно, рассматриваться как исключительно остаточная радиация. При наземном (надводном) взрыве должна учитываться как начальная, так и остаточная радиация.

Продукты деления

IX.4. Как указывалось в главе I, продукты деления составляют очень сложную смесь, состоящую почти из 200 различных изотопов 35 элементов. Большая часть этих изотопов обладает радиоактивностью и претерпевает распад с испусканием бета-частиц, часто сопровождаемый гамма-излучением. На каждую тысячу тонн тротилового эквивалента делящегося ядерного заряда образуется около 49,5 *г* продуктов деления. Общая радиоактивность продуктов деления, первоначально чрезвычайно большая, очень быстро падает в результате радиоактивного распада (см. § 1.23).

IX.5. По истечении первой минуты после момента ядерного взрыва (данное время условно принято за начало образования остаточного ядерного излучения) общая радиоактивность, обусловленная продуктами деления, образующимися при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т*, можно сравнить с радиоактивностью 100 тыс. *т* радия. Из этого видно, что при взрывах ядерных зарядов, тротиловый эквивалент которых имеет величину порядка миллионов тонн, количество образующейся радиоактивности является чрезвычайно большим. Радиоактивность, образующаяся через одну минуту после взрыва, к концу суток уменьшается больше чем в 6000 раз. Несмотря на такое резкое снижение радиоактивности, мощность дозы излучения через сутки после взрыва может быть все еще достаточно большой.

IX.6. Было подсчитано, что если бы радиоактивные продукты, образовавшиеся при взрыве делящегося ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*, могли быть равномерно распределены на площади 26 000 *км*², то мощность дозы излучения на высоте 0,9 *м* от поверхности земли спустя 24 часа после взрыва составила бы 2,7 *р/час*. На самом деле равномерное распределение практически маловероятно, так как вблизи эпицентра будет выпадать больше продуктов деления, чем в местах, расположенных на значительных расстояниях от места взрыва. Отсюда следует, что мощность дозы излучения на участках местности, расположенных вблизи места

взрыва, будет значительно превышать упомянутое среднее значение, а в районах, находящихся на больших расстояниях от места взрыва, величина мощности дозы будет значительно меньше 2,7 *р/час*.

IX.7. Некоторое представление о скорости уменьшения радиоактивности продуктов деления во времени может быть получено из следующей приближенной закономерности: каждое семикратное увеличение времени после взрыва приводит к падению радиоактивности в десять раз. Например, если интенсивность излучения через 1 час после взрыва взята в качестве начального значения, то через 7 часов после взрыва интенсивность излучения понизится в десять раз; спустя $7 \times 7 = 49$ часов (или, грубо говоря, через двое суток) интенсивность составит одну сотую долю, а спустя $7 \times 7 \times 7 = 343$ часа (приблизительно через 2 недели) она составит только одну тысячную часть интенсивности излучения, которая имела место через 1 час после взрыва. Другая сторона этой закономерности состоит в том, что в конце первой недели (7 дней) интенсивность излучения будет составлять одну десятую долю интенсивности, наблюдавшейся спустя 1 день после взрыва. Это правило применимо в течение примерно 200 дней со времени взрыва, после чего интенсивность излучения уменьшается быстрее.

IX.8. Данные относительно понижения радиоактивности продуктов деления могут быть получены из графика, изображенного на рис. IX.8, на котором показана зависимость отношения приближенного значения мощности дозы (в *р/час*) для любого момента времени после взрыва к мощности дозы через 1 час после взрыва от времени. Следует отметить, что мощность дозы через 1 час после взрыва используется в данном случае в качестве эталона. Это сделано исключительно с целью упрощения расчетов и получения наглядного представления о результатах действия ядерного излучения. На значительных расстояниях продукты деления, образующиеся при мощных взрывах, могут не достигнуть поверхности земли даже спустя несколько часов после их образования. Тем не менее при расчетах все же используется гипотетическая (эталонная) мощность дозы. Она представляет собой мощность дозы ядерной радиации, которая наблюдалась бы спустя 1 час после взрыва при условии, что к этому времени выпадение радиоактивных продуктов взрыва полностью завершилось бы.

IX.9. Предположим, например, что в данном месте выпадение продуктов взрыва начинается через 5 часов после взрыва и что через 15 часов, когда это выпадение практически закончится, мощность дозы в этом месте составит 3,9 *р/час*. Из графика, показанного на рис. IX.8 (или табл. IX.11), легко найти, что гипотетическая мощность дозы через 1 час после взрыва, условно принятая в качестве эталона, равна 100 *р/час*. При помощи этого эталонного значения и графика распада, показанного на рис. IX.8, можно определить фактическую мощность дозы, наблюдаемую в данном месте в любое время после того, как полностью окончится выпадение

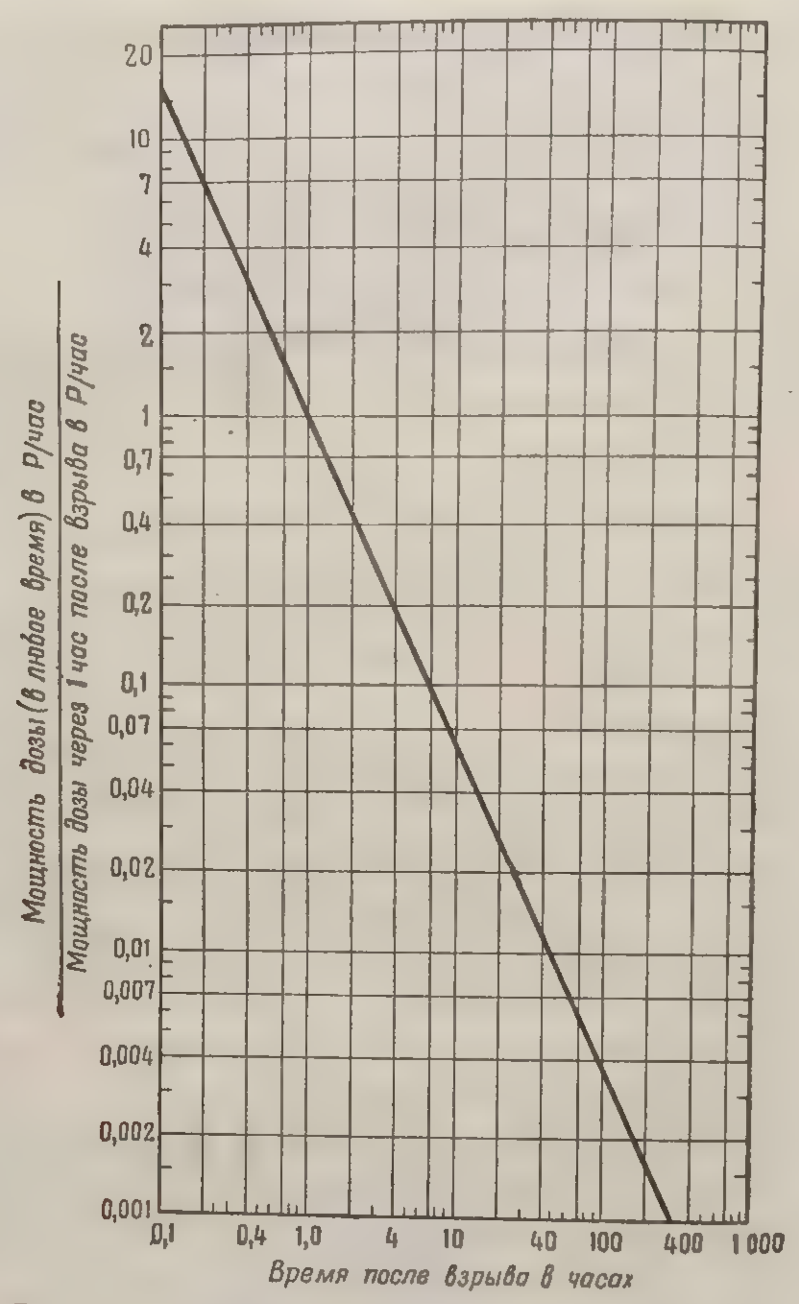


Рис. IX.8 Уменьшение мощности дозы радиации, создаваемой продуктами деления во времени

радиоактивных продуктов взрыва. Таким образом, если требуется определить мощность дозы через 24 часа после взрыва, то из графика видно, что искомая величина составляет $0{,}02 \times 100 = 2$ *р/час*.

IX.10. Если мощность дозы в какое-либо время после взрыва известна по данным фактического измерения, то для любого другого момента времени она может быть найдена расчетным путем. Для этого необходимо сравнить между собой отношения, определяемые из графика IX.8 для двух заданных моментов времени.

Например, предположим, что мощность дозы, измеренная через 3 часа после взрыва, равна 50 *р/час*. Требуется определить величину мощности дозы через 18 часов.

Из графика IX.8 находим, что отношения мощностей доз к эталонной мощности дозы составляют для трех часов 0,27 и для 18 часов 0,031. Отсюда следует, что мощность дозы через 18 часов после взрыва составит $\frac{50\times0{,}031}{0{,}27}=5{,}7$ *р/час*.

IX.11. Данные графика, изображенного на рис. IX.8, могут быть представлены в виде таблицы (табл. IX.11), которая более удобна для использования, хотя она и содержит менее полные данные. В качестве эталонной мощности дозы через 1 час после взрыва принята величина, равная 1000 условных единиц.

В этой таблице значения мощностей доз для ряда последовательных моментов времени даны в тех же условных единицах. Если известна фактическая мощность дозы для времени, равного одному часу (или другого момента времени) после взрыва, то значение для любого интересующего нас момента времени вплоть до 1000 часов может быть рассчитано путем составления обычной пропорции[1].

Таблица IX.11

Значения мощностей доз для различных моментов времени после ядерного взрыва (выраженные в условных единицах)

Время, *час*	Относительная мощность дозы	Время, *час*	Относительная мощность дозы
1	1000	30	17
1,5	610	40	12
2	440	60	7,3
3	270	100	4,0
5	150	200	1,7
7	97	400	0,75
10	63	600	0,46
15	39	800	0,33
20	27	1000	0,25

IX.12. Необходимо отметить, что график, представленный на рис. IX.8, и таблица IX.11 обычно используются для расчетов мощностей доз. Для того чтобы определить действительную или суммарную дозу полученного излучения, необходимо среднее значение мощности дозы умножить на время облучения (см. § VIII.24).

Однако мощность дозы во время облучения непрерывно уменьшается, поэтому в полученный результат необходимо внести соответствующую поправку. Это лучше всего может быть достигнуто

[1] Для быстрых расчетов мощностей доз, обусловленных радиоактивными продуктами взрыва, осевшими на землю, было предложено несколько простых приборов, напоминающих счетную логарифмическую линейку.

путем интегрирования простого уравнения, которое выражает изменение мощности дозы во времени (см. § IX.112). Результаты расчетов представлены в виде кривой на рис. IX.12. Эта кривая характеризует значение полученной суммарной дозы остаточной радиации, обусловленной продуктами деления за время от 1 минуты после взрыва до любого заданного момента времени. Значения суммарной дозы выражены в единицах эталонной мощности дозы, рассчитанной для 1 часа после взрыва.

IX.13. Метод использования графика, изображенного на рис. IX.12, иллюстрируется следующим примером. Предположим, что человек начал облучаться на местности, зараженной продуктами деления, через 2 часа после ядерного взрыва и что мощность дозы, измеренная в это время, составляла 1,5 *р/час*. Требуется определить величину суммарной дозы, которая будет получена этим человеком в течение последующих 12 часов, т. е. к 14 часу после взрыва.

При определении суммарной дозы прежде всего необходимо определить эталонную мощность дозы для одного часа после взрыва. Из графика, показанного на рис. IX.8, видно, что отношение

$$\frac{\text{Мощность дозы через 2 часа после взрыва}}{\text{Мощность дозы (эталонная) через 1 час после взрыва}} = 0{,}43,$$

и так как известно, что мощность дозы через 2 часа после взрыва составляет 1,5 *р/час*, то значение мощности дозы для 1 часа, которая условно принята в качестве эталона, будет $1{,}5/0{,}43 = 3{,}5$ *р/час*. Далее из графика находим, что соответственно для 2 и 14 часов после взрыва

$$\frac{\text{Суммарная доза, полученная за 2 часа после взрыва}}{\text{Мощность дозы (эталонная) через 1 час после взрыва}} = 7{,}0$$

и

$$\frac{\text{Суммарная доза, полученная за 14 часов после взрыва}}{\text{Мощность (эталонная) дозы через 1 час после взрыва}} = 8{,}4.$$

Отсюда, вычитая, находим:

$$\frac{\text{Доза, полученная за время между 2 и 14 часами после взрыва}}{\text{Мощность дозы (эталонная) через 1 час после взрыва}} = 1{,}4.$$

Эталонная мощность дозы через 1 час после взрыва равна 3,5 *р/час*; следовательно, суммарная доза, полученная в течение 12 часов (между 2 и 14 часами после взрыва), составит $3{,}5 \cdot 1{,}4 = 4{,}9$ *р*.

IX.14. В таблице IX.14 приводятся значения долей **предельной дозы**, выраженные в процентах, которые соответствуют различным промежуткам времени облучения после полного выпадения продуктов ядерного взрыва. Предельная доза является в действительности такой дозой, которая была бы получена при непрерыв-

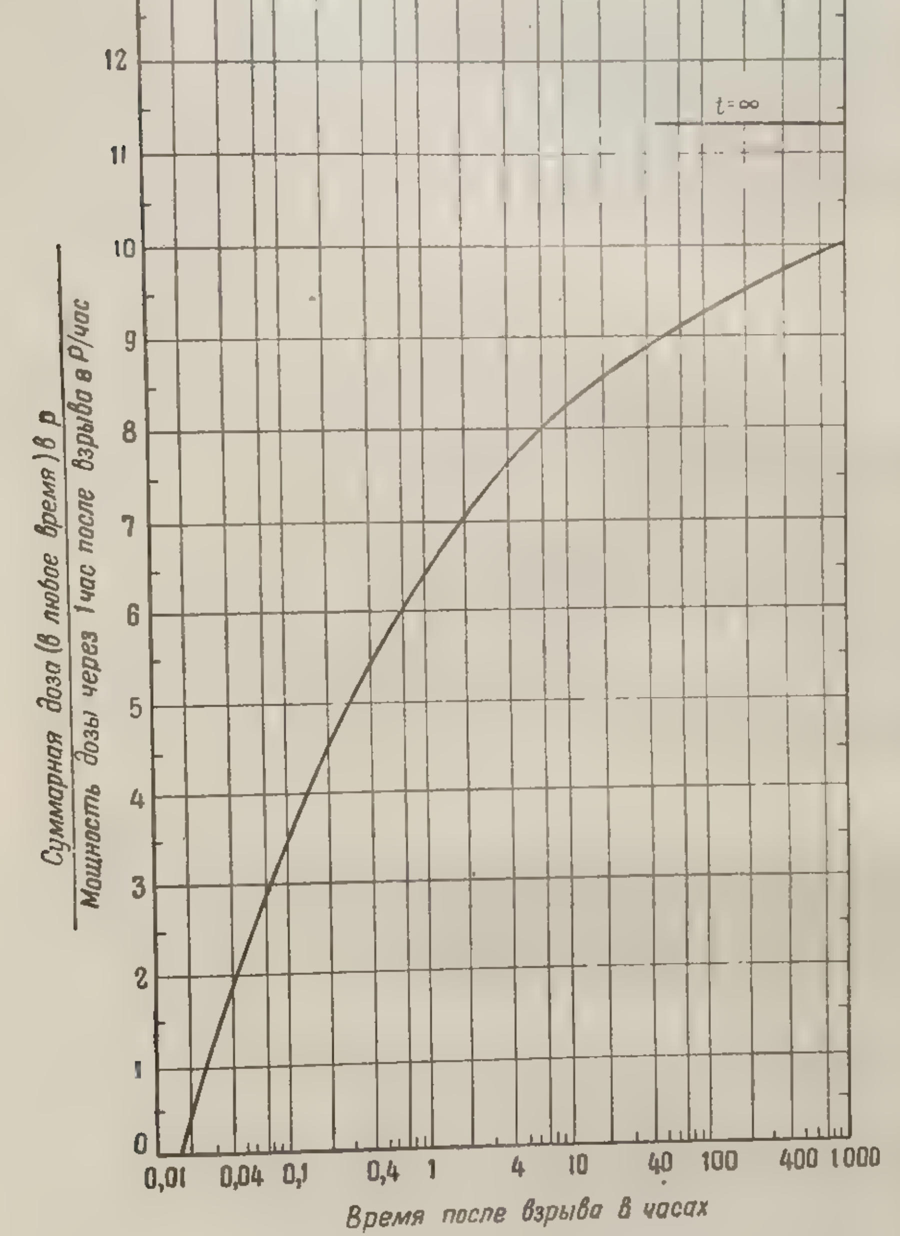


Рис. IX.12. Суммарная доза остаточного излучения, обусловленная продуктами деления; время начала испускания остаточной радиации условно принято равным 1 минуте после взрыва

ном облучении определенным количеством продуктов деления в течение многих лет.

IX.15. Например, если человек подвергается облучению некоторым количеством выпавших на землю продуктов деления в промежуток времени от 2 до 14 часов после взрыва, то доза, полученная за это время, выраженная в процентах от предельной дозы, может быть определена вычитанием соответствующих значений, получаемых из таблицы IX.14, т. е. вычитанием из 74 (для 14 часов) 62 (для 2 часов), в результате которого получаем 12% предельной дозы. Действительное расчетное значение предельной дозы, полученной за все время, начиная с момента, соответствующего одной минуте после взрыва, как показано на рис. IX.12, в 11,3 раза больше эталонной мощности дозы (в *р/час*). Отсюда, если известно значение эталонной мощности дозы (или если возможно ее рассчитать), величина суммарной дозы, полученная в течение любого периода времени, может быть определена по данным табл. IX.14 (вместо использования данных графика, изображенного на рис. IX.12).

IX.16. Используя данные графиков (рис. IX.8 и IX.12) или соответствующих им таблиц IX.11 и IX.14, можно производить различные расчеты мощностей доз и суммарных доз излучения, обусловленных распадом продуктов деления. Однако, как будет показано ниже, определение указанных величин можно упростить при помощи специальных графиков, построенных на основе данных таблиц IX.11 и IX.14 (см. рис. XII.107 и XII.108).

Таблица IX.14

Доля предельной дозы остаточной радиации, полученной за различное время после взрыва

Время, *час*	Доля предельной дозы, %	Время, *час*	Доля предельной дозы, %
1	56	48	80
2	62	72	81
4	67	100	82
6	69	200	85
12	73	500	87
24	77	1000	89
36	79	2000	90

IX.17. Важно уяснить, что таблицы и графики, приведенные выше, а также расчеты мощностей и суммарных доз, в которых данные этих таблиц и графиков использовались, исходят из предположения, что человек подвергается воздействию излучений, испускаемых определенным количеством продуктов деления, без защиты и что он непрерывно в течение всего периода времени находится в одной и той же зоне радиоактивного заражения. Однако

в реальной обстановке выпадения радиоактивных осадков эти условия, вероятно, не будут иметь места. Во-первых, любое укрытие, которое ослабляет излучение, приведет к определенному уменьшению мощности дозы, следовательно, и суммарной дозы остаточной радиации. Далее, в результате действия ветра и других метеорологических факторов выпадающие радиоактивные частицы будут рассеиваться, что вызовет уменьшение количества продуктов деления в данном месте, а это в свою очередь приведет к понижению мощности дозы, а следовательно, и суммарной дозы излучения.

Радиоактивность, наведенная нейтронами

IX.18. Нейтроны, освобождающиеся в процессе деления, за исключением тех, которые расходуются на развитие цепной реакции, в конечном итоге захватываются материалами бомбы, атмосферным азотом (особенно) и кислородом, а также различными элементами, находящимися в верхних слоях почвы. В результате захвата нейтронов многие вещества становятся радиоактивными. Впоследствии эти вещества в течение продолжительного времени испускают бета-частицы; процесс испускания бета-частиц часто сопровождается гамма-излучением. Наведенная таким образом радиоактивность составляет один из источников остаточной ядерной радиации.

IX.19. Величина радиоактивности, наведенной в материалах бомбы, изменяется в широких пределах, так как она в большей степени зависит от устройства и конструктивных характеристик ядерной бомбы. Любые радиоактивные изотопы, образующиеся при захвате нейтронов остатками боеприпаса, остаются вместе с продуктами деления вещества ядерного заряда. Эти изотопы будут оказывать некоторое влияние на общую скорость радиоактивного распада, вследствие чего действительные значения мощности дозы и суммарной дозы не будут совпадать с данными графиков, изображенных на рис. IX.8 и IX.12. Однако отклонения суммарной скорости распада всех радиоактивных продуктов взрыва от скорости распада продуктов деления, вероятно, не будут иметь существенного значения, за исключением, может быть, короткого промежутка времени, следующего непосредственно за моментом взрыва.

IX.20. Когда нейтроны захватываются в атмосфере ядрами кислорода и азота, то образующаяся при этом радиоактивность, поскольку вопрос касается остаточного ядерного излучения, имеет очень малое значение, и ею можно пренебречь. Ядра атомов кислорода, например, взаимодействуют с быстрыми нейтронами очень слабо; причем образующийся при этом взаимодействии изотоп радиоактивного азота имеет период полураспада, равный только 7 секундам. Поэтому он почти полностью распадается в течение одной или двух минут после взрыва. При захвате нейтронов ядрами азота образуется радиоактивный изотоп — углерод-14; этот

изотоп испускает бета-частицы с относительно низкой энергией, причем радиоактивный распад углерода-14 не сопровождается излучением гамма-лучей. Поскольку в природе имеются уже большие количества этого изотопа, то дополнительное излучение, испускаемое небольшим количеством углерода-14, которое образуется при ядерных взрывах, не может представлять заметной опасности, и им обычно пренебрегают.

IX.21. Важная составная часть остаточного ядерного излучения может быть обусловлена наведенной радиоактивностью, образующейся при захвате нейтронов некоторыми элементами, находящимися в почве. Одним из таких элементов, заслуживающих наибольшего внимания, является натрий. Хотя содержание натрия в почве среднего состава является обычно относительно незначительным, все же количество радиоактивного натрия-24, образующегося в результате захвата нейтронов, может быть весьма заметным. Период полураспада этого изотопа составляет 14,8 часа; он испускает как бета-частицы, так и гамма-лучи (последние имеют более важное значение) с относительно высокой энергией[1].

IX.22. Другим источником наведенной радиоактивности является элемент магний, который имеет существенное значение для роста растений и входит, хотя и в небольших количествах, в состав различных почв. В результате захвата нейтронов этим элементом образуется радиоизотоп магний-56, период полураспада которого равен 2,6 часа. При радиоактивном распаде магний-56, помимо бета-частиц, излучает также несколько различных по энергиям гамма-лучей, причем значения этих энергий являются достаточно высокими. Так как его период полураспада меньше, чем у натрия-24, то магний-56 теряет свою активность значительно быстрее. Тем не менее в течение первых нескольких часов после взрыва магний может представлять значительно более серьезную опасность, чем натрий.

IX.23. Более важной составной частью почвы является кремний, который при захвате нейтронов образует радиоактивный кремний-31. Период полураспада этого изотопа равен 2,6 часа. Распад его сопровождается испусканием бета-частиц и гамма-лучей; однако количество испускаемых гамма-фотонов составляет не более 0,07% от числа радиоактивных распадов. Позже будет показано, что бета-частицы могут вызывать серьезные поражения только при определенных условиях. Алюминий, другой распространенный компонент почвы, может образовывать радиоизотоп алюминий-28, период полураспада которого составляет только 2,3 минуты. Изотопы, подобные алюминию-28, имеющие корот-

[1] При каждом акте распада изотопа натрия-24 образуется два фотона гамма-излучения с энергией 1,4 и 2,8 *Мэв* соответственно. Энергия, приходящаяся в среднем на один фотон, испускаемый продуктами деления, равна 0,7 *Мэв*, хотя на более ранней стадии радиоактивного распада продуктов взрыва значение энергии гамма-лучей выше этого значения.

кий период полураспада, обусловливают значительную долю высокой начальной радиоактивности. Однако вследствие большой скорости распада этих изотопов их количество в почве через час после ядерного взрыва остается ничтожным.

IX.24. При захвате нейтронов ядрами водорода, входящего в состав воды, образуется нерадиоактивный (устойчивый) изотоп дейтерий. Таким образом, в результате такого захвата нейтронов общая радиоактивность не увеличивается. Ранее уже отмечалось, что вследствие очень короткого периода полураспада радиоактивного изотопа кислорода наведенной радиоактивностью этого элемента можно пренебречь. Однако вещества, растворимые в воде, особенно соли (хлористый натрий), содержащиеся в морской воде, могут быть источниками мощной наведенной радиоактивности. Как уже упоминалось выше, при захвате нейтронов натрием и хлором образуются радиоактивный натрий-24 и радиоактивный хлор-38, которые излучают как бета-частицы, так и гамма-лучи, обладающие высокой энергией. Однако период полураспада хлора-38 составляет только 37 минут, вследствие чего его активность спустя 4—5 часов после взрыва падает примерно до 1% от первоначальной.

IX.25. Кроме взаимодействия с элементами, входящими в состав почвы и воды, нейтроны, образующиеся при ядерном взрыве, могут быть захвачены ядрами других элементов, которые содержатся в строительных и прочих материалах. Среди металлов основными источниками наведенной радиоактивности являются, вероятно, цинк, медь и магний (последний входит в состав многих сталей), а также в меньшей степени железо. Маловероятно, чтобы древесина и одежда при захвате нейтронов становились заметно радиоактивными; стекло же может стать радиоактивным из-за большого содержания в нем натрия и кремния. Наведенная радиоактивность пищевых продуктов может быть обусловлена главным образом захватом нейтронов натрием. Однако на таких расстояниях от места ядерного взрыва и при таких условиях, при которых эта активность была бы значительной, пища, вероятно, будет непригодной для употребления по другим причинам, а именно: вследствие воздействия на нее ударной волны и светового излучения. Некоторые элементы, такие, например, как бор, поглощают нейтроны, не становясь при этом радиоактивными; наличие таких элементов приводит к уменьшению наведенной радиоактивности.

Уран и плутоний

IX.26. Часть урана или плутония, которая при ядерном взрыве не подвергается делению, представляет собой один из возможных источников остаточного ядерного излучения. Делящиеся изотопы этих элементов испускают альфа-частицы, а также некоторое ко-

личество гамма-лучей с низкой энергией. Однако, так как их период полураспада очень большой, то радиоактивность этих изотопов является ничтожной по сравнению с активностью продуктов деления.

IX.27. Ниже будет показано (§ IX.30), что альфа-частицы, образующиеся при распаде ядер урана и плутония или испускаемые другими источниками, почти полностью поглощаются в слое воздуха толщиной в 2,5—5 *см*. Это обстоятельство и тот факт, что альфа-частицы не могут проникать даже через обычную одежду, указывают на то, что уран и плутоний, осаждающиеся на поверхность земли, не представляют собой серьезной опасности в качестве внешнего источника облучения. Даже если эти радиоактивные изотопы попадают на неповрежденную кожу человека, то и при этом условии альфа-частицы, испускаемые ими, не в состоянии проникнуть внутрь организма.

IX.28. Несмотря на то, что уран и плутоний представляют ничтожную опасность при внешнем облучении человека, положение может сильно измениться, если какой-либо из этих элементов попадет внутрь организма через легкие, пищеварительный тракт или через раны на коже. Плутоний, например, имеет способность осаждаться преимущественно в костях и вследствие продолжительного действия альфа-частиц, испускаемых им, может вызвать серьезные поражения всего организма.

IX.29. В одно время предполагалось, что взрыв достаточно большого числа плутониевых бомб может привести к широкому распространению смертоносного материала (плутония) на поверхности земли, что будет опасно для всего мира. Расчеты показали, что для создания такого заражения потребовалось бы очень большое количество плутония, превышающее миллионы килограммов. В настоящее время известно, что продукты деления, в особенности радиоактивный изотоп — стронций-90, представляют собой, вероятно, более серьезную опасность, чем плутоний. Кроме того, все мероприятия, направленные на уменьшение опасности поражения продуктами деления, которые к тому же значительно легче обнаружить, автоматически приводят к уменьшению опасности поражения плутонием. Некоторые данные о поведении этого элемента в организме человека будут приведены в главе XI.

ОСЛАБЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ЯДЕРНОЙ РАДИАЦИИ

Альфа- и бета-частицы

IX.30. Альфа- и бета-частицы при прохождении через вещество непосредственно вызывают значительную ионизацию последнего и вследствие этого быстро теряют свою энергию. После прохождения определенного расстояния, называемого **длиной пробега**,

альфа-частица как таковая прекращает свое существование[1]. Длина пробега альфа-частицы зависит от ее начальной энергии; однако даже в случае распада плутония, при котором освобождаются альфа-частицы, обладающие очень высокой энергией, средняя длина пробега этих частиц в воздухе составляет примерно 3,8 *см*. В среде, имеющей большую плотность, например в воде или в тканях организма, длина пробега альфа-частиц еще меньше и составляет около одной тысячной доли от длины их пробега в воздухе. Следовательно, альфа-частицы, испускаемые радиоактивными источниками, не в состоянии проникнуть даже через внешний слой кожи (эпидерму). Из этого следует, что вопрос об ослаблении альфа-частиц, испускаемых радиоактивными источниками, находящимися вне организма, не представляет собой сколько-нибудь серьезной проблемы.

IX.31. Бета-частицы, подобно альфа-частицам, обладают способностью при прохождении через вещество непосредственно вызывать его ионизацию. Но поскольку бета-частицы теряют свою энергию медленнее, то длина их пути пробега в воздухе и других материалах значительно больше. Большая часть бета-частиц, испускаемых продуктами деления, до их поглощения проходит в воздухе общее расстояние, равное 3 *м* (и больше). Однако так как бета-частицы непрерывно отклоняются электронами и ядрами среды от их первоначального направления движения, то они проходят сложный зигзагообразный путь, и таким образом эффективная длина их пробега несколько меньше.

IX.32. Длина пробега бета-частиц зависит от плотности среды. Чем плотнее среда, тем короче длина пробега бета-частиц в ней; можно считать, что среднее эффективное расстояние, проходимое частицей с данной энергией в воде, древесине или ткани организма, составляет приблизительно 0,001 расстояния, проходимого этой частицей в воздухе. Таким образом, лица, находящиеся внутри помещения, будут защищены от бета-излучения, возникающего при распаде продуктов деления, осевших вне здания. Очевидно, даже обычная одежда обеспечивает значительное ослабление бета-излучения, причем степень этого ослабления колеблется в зависимости от плотности одежды и числа слоев ткани.

Гамма-излучение

IX.33. Длина пробега остаточного гамма-излучения в сильной степени отличается от длины пробега альфа- и бета-частиц. Это излучение, подобно гамма-лучам, составляющим часть начального

[1] Альфа-частица тождественна с ядром атома гелия (см. § I.51). Потеряв бо́льшую часть своей энергии, альфа-частица захватывает два электрона и становится обыкновенным (нейтральным) атомом гелия.

ядерного излучения, обладает способностью проникать на значительные расстояния в воздухе и тканях организма. Чтобы свести к минимуму поражающее действие остаточного гамма-излучения, необходимо принимать определенные меры, направленные на ослабление гамма-лучей, испускаемых внешними источниками. В данном случае любой способ, используемый для ослабления гамма-излучения, приведет также к значительному ослаблению как альфа-, так и бета-частиц.

IX.34. Поглощение остаточного гамма-излучения, испускаемого продуктами деления и радиоизотопами, образующимися при захвате нейтронов, например, натрием и магнием, основывается на таких же точно принципах, какие были описаны в главе VIII в связи с начальным гамма-излучением. Исключение, однако, составляют наиболее ранние стадии радиоактивного распада. Это вызвано тем, что гамма-лучи, образующиеся при распаде продуктов деления, обладают в среднем значительно меньшей энергией по сравнению с энергией гамма-лучей, которые испускаются в течение первой минуты после ядерного взрыва[1]. Это означает, что ослабление остаточного гамма-излучения достигается значительно легче, чем начального. Другими словами, для ослабления начального и остаточного излучений данным материалом на одну и ту же степень в случае остаточного излучения потребуется слой этого материала меньшей толщины.

IX.35. В табл. IX.35 приводятся приближенные значения толщин слоев половинного ослабления некоторых материалов, обычно используемых для поглощения гамма-излучений, испускаемых продуктами деления. При использовании этих данных следует учитывать их неточность, вытекающую из соображений, изложенных в § VIII.43.

Сравнение значений этих толщин с величинами, приведенными в табл. VIII.44 для начального гамма-излучения, показывает, что остаточное излучение ослабляется в значительно большей степени. В обоих случаях для различных материалов порядок величин один и тот же, так как толщина слоя половинного ослабления определяется в основном плотностью материала. Значения, приведенные в последней графе табл. IX.35, показывают, что произведение плотности материала и толщины слоя половинного ослабления во всех упомянутых случаях примерно одинаково (см. § VIII.45).

---

[1] Средняя энергия гамма-лучей, образующихся при распаде продуктов деления (за исключением наиболее ранних стадий распада), составляет около 0,7 *Мэв* на 1 фотон. Для сравнения напомним, что эффективное значение энергии начального гамма-излучения равно примерно 4,5 *Мэв* (см. § VIII.92).

Таблица IX.35

Приближенные значения толщин слоев половинного ослабления некоторых материалов, обычно используемых для поглощения гамма-лучей, испускаемых продуктами деления

Материал	Плотность, *г/см³*	Толщина слоя половинного ослабления, *см*	Произведение
Сталь	7,8	1,8	14,0
Бетон	2,3	5,6	13,0
Грунт	1,6	8,4	13,5
Вода	1,0	12,2	12,2
Древесина	0,55	21,4	11,8

IX.36. Величины степени ослабления (см. § VIII.46) остаточного гамма-излучения для различных толщин стали, бетона, грунта и древесины приведены на графике (рис. IX.36), который аналогичен графику (см. рис. VIII.47), построенному для начального гамма-излучения. Из графика (рис. IX.36) видно, что для ослабления остаточного излучения в 50 раз требуется слой бетона толщиной в 38 *см*. Для сравнения напомним, что для достижения такой же степени ослабления начального гамма-излучения требуется слой бетона толщиной 74 *см* (см. § VIII.47).

IX.37. С практической точки зрения интересно установить степень ослабления, которую можно ожидать внутри различных сооружений. Эта степень ослабления обусловливается влиянием расстояния (источник излучения может находиться на значительном удалении, например, на крыше или на улице) и поглощением излучения крышей и стенами. Приближенные значения степени ослабления, приведенные в табл. IX.37, были определены отчасти расчетным путем, а отчасти на основе измерений в полевых условиях. Следует отметить, что в подвале каркасного дома интенсивность остаточного гамма-излучения ослабляется примерно до одной десятой интенсивности излучения, наблюдающейся вне дома. Слой грунта толщиной 0,91 *м* ослабляет интенсивность излучения примерно в 1000 раз (или даже больше).

Таблица IX.37

Степень ослабления остаточного гамма-излучения для сооружений

Тип сооружения	Примерная степень ослабления
Каркасный дом:	
первый этаж	2
подвал	10
Многоэтажное железобетонное здание:	
нижние этажи (вдали от окон)	10
подвал (полностью заглублен в грунт)	1000 и более
Убежище ниже уровня земли на 0,91 *м*	1000 и более

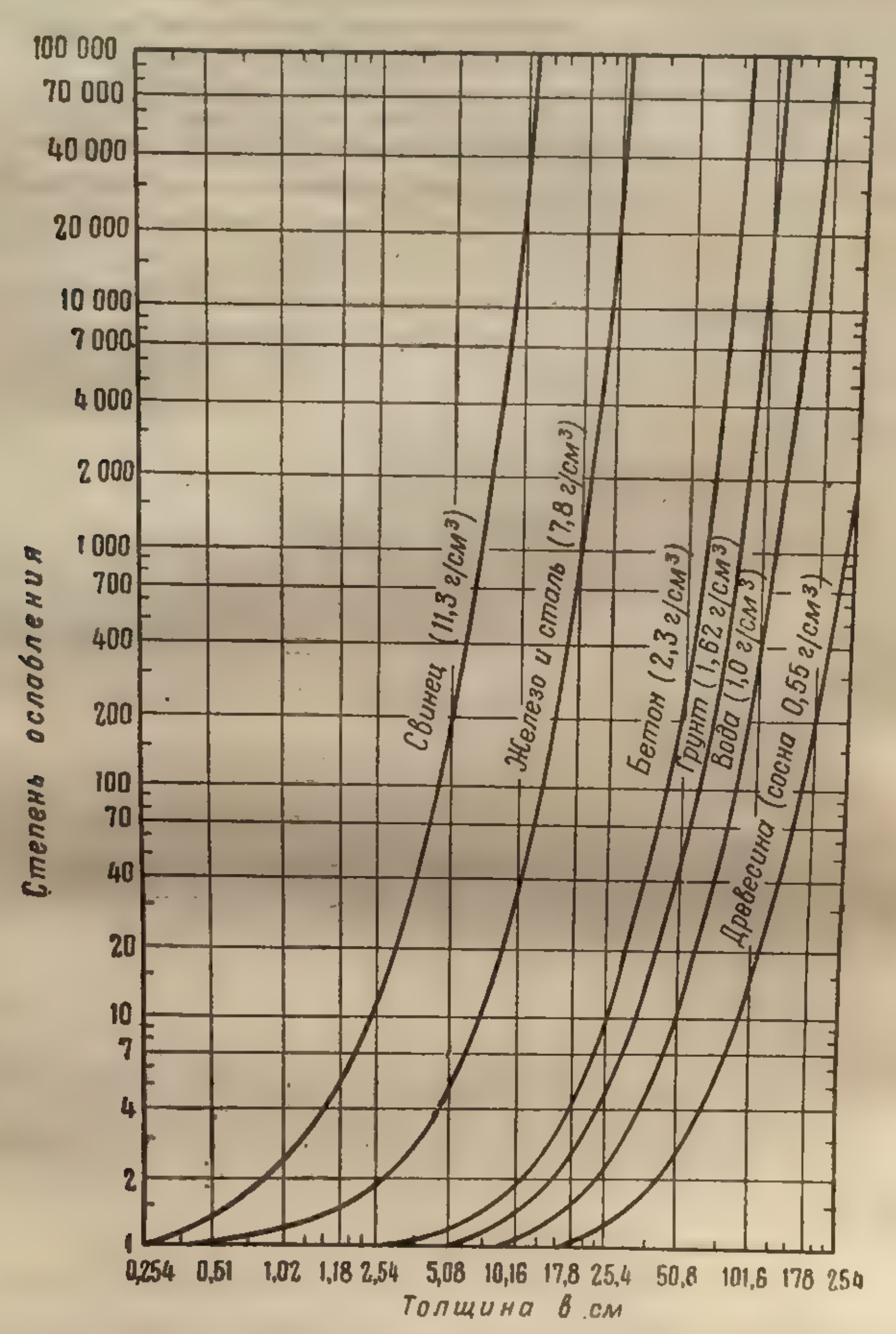


Рис. IX.36. Степень ослабления остаточного гамма-излучения, испускаемого продуктами деления в зависимости от толщины различных материалов

РАДИАЦИОННЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

Острое и хроническое облучение

IX.38. При рассмотрении вредных воздействий на организм гамма-излучений, испускаемых внешними источниками, необходимо различать облучение **острое** (или **однократное**) и **хроническое**. При остром облучении полная доза радиации получается в течение относительно короткого периода времени. Такого рода облучение может иметь место, например, при воздействии начальной ядерной радиации, рассмотренной в предыдущей главе. Дать точное определение понятия дозы острого облучения невозможно; эта доза может быть определена несколько произвольно как доза, полученная при облучении в течение 24 часов. Поскольку остаточная радиация, испускаемая продуктами деления, оказывает поражающее действие в течение более длительного периода времени, то и облучение, обусловливаемое этим излучением, может носить хронический характер.

IX.39. Важность установления различия между острым и хроническим облучением заключается в том, что при небольшой мощности дозы организм в состоянии во время облучения частично восстанавливать некоторые функции, нарушенные ядерными излучениями. Таким образом, если не учитывать некоторых последствий, о которых будет упомянуто ниже, можно с уверенностью сказать, что доза излучения, полученная, например, за 1 минуту, является более опасной, чем такая же по величине доза, но полученная в течение более длительного периода времени, например за несколько дней.

IX.40. В разделе VIII.26 отмечалось, что доза гамма-излучения в 450 *р*, полученная при остром облучении всего организма, может оказаться смертельной для 50% облученных людей. Если бы такое же число рентгенов было получено в течение нескольких недель, то вероятность смертельных исходов была бы меньше. Вследствие того, что восстановительная способность организма зависит от многих факторов, в настоящее время не представляется возможным точно определить степень восстановления вредных последствий хронического облучения. Некоторые из этих последствий, касающиеся генетических изменений, по-видимому, неустранимы (см. § XI.124); что же касается бо́льшей части очевидных поражений, то с полной определенностью можно сказать, что данная доза излучения, полученная в течение длительного периода времени, например за две недели и больше, является менее опасной, чем такая же по числу рентгенов доза, но полученная в течение 24 часов.

Естественные излучения

IX.41. В связи с рассмотрением вопроса о дозах хронического облучения можно отметить, что человеческий организм приспособлен к определенному количеству излучения, которое он получает непрерывно в течение продолжительного периода времени. Это утверждение основывается на том факте, что все живые существа всегда подвергаются воздействию излучений от различных природных источников, находящихся как внутри, так и вне организма. Основным внутренним источником является радиоактивный изотоп калий-40, который представляет собой составную часть элемента калия, обычно встречающегося в природе. Углерод-14, имеющийся в организме, также радиоактивен, но он является сравнительно слабым источником внутреннего излучения. Калий-40 так же, как и радиоактивный уран, торий и радий, встречается в различных количествах в почве и скальных породах. Наконец, важным природным источником ядерного излучения являются так называемые **космические лучи**, проникающие на землю из мирового пространства. Доза излучения, полученная за счет этих лучей, возрастает с увеличением высоты; на высоте 5000 *м* она в пять с лишним раз больше, чем на уровне моря.

IX.42. Значение суммарной дозы излучения, обусловленной исключительно природными источниками, которую получает человек в течение года при облучении всего организма, приводится в табл. IX.42. Данные таблицы получены в предположении, что подстилающей породой является гранит и что облучение происходит на уровне моря и высоте, равной 1500 *м*. В некоторых районах дозы естественного излучения, исходящего из почвы и горных пород, меньше доз излучения, исходящего из гранита. В общем можно утверждать, что для большинства районов США доза природного излучения, получаемая человеком в год, составляет 0,14—0,16 *р*.

Таблица IX.42

Доза излучения, получаемая человеком в течение года

Источник излучения	Количество рентгенов в год	
	на уровне моря	на высоте 1500 *м*
Калий внутри организма	0,020	0,020
Торий, уран и радий в граните	0,055	0,055
Калий в граните	0,035	0,035
Космические лучи	0,035	0,050
Всего	0,145	0,16

IX.43. Из этой таблицы следует, что в среднем каждый человек, подвергаясь воздействию ядерных излучений, испускаемых природными источниками, получает на протяжении своей жизни суммарную дозу от 10 до 12 *р*. Кроме того, могут быть местные облучения, связанные с просвечиванием рентгеновскими лучами грудной клетки, ротовой полости и т. п. и даже с воздействием светящихся циферблатов ручных часов и различных приборов. Воздействие на человека излучений, испускаемых природными источниками, продолжается, несомненно, в течение всего периода его жизни.

Максимально допустимая доза облучения

IX.44. Очевидно, что человеческий организм как в прошлом, так и в настоящем постоянно подвергается воздействию ядерных излучений, испускаемых радиоактивными источниками, находящимися как внутри, так и вне организма. В результате достигнуто устойчивое (или равновесное) биологическое состояние организма. Этот факт подтверждает, что (если исключить из рассмотрения влияние излучений генетического характера) существует такая доза хронического облучения, последствия которого организм имеет силу частично устранять. Что касается величины этой дозы, то вполне определенные данные по этому вопросу отсутствуют. Во всяком случае, величина этой дозы зависит от состояния организма, и для разных людей она будет различной.

IX.45. Несмотря на некоторую неопределенность понятия **допустимой дозы облучения**, все же могут быть сделаны некоторые общие выводы, основанные на сведениях, полученных от радиологов и специалистов по рентгенологии, а также на данных наблюдений за биологическими поражениями, вызванными радием, и на данных экспериментов над животными. Эти выводы по мере дальнейшего накопления сведений о влиянии различных ядерных излучений на живые организмы будут пересматриваться в сторону их уточнения.

IX.46. С развитием работ по использованию ядерной энергии как для мирных, так и для военных целей многие лица, помимо облучения природными источниками, подвергаются также дополнительному воздействию ядерных излучений в процессе их работы. Чтобы обезопасить здоровье людей, работающих с радиоактивными источниками излучений, в Соединенных Штатах Америки установлена **максимально допустимая доза облучения**, равная для взрослого человека 0,3 *р* в неделю. В настоящее время считается, что лица, занятые в атомной промышленности, могут в течение многих лет, не подвергаясь чрезмерному риску, получать дозу

ядерного излучения при общем облучении всего организма, равную 0,3 *р* в неделю, т. е. 15 *р* в год[1].

IX.47. Таким образом, воздействие ядерного излучения на человечество не является для него совершенно новым. Более того, можно считать установленным, что организм обладает способностью частично восстанавливать некоторые функции, если они нарушены определенными дозами хронического облучения. Можно полагать, что максимально допустимая доза хронического облучения, рекомендуемая для лиц, работающих в области ядерной энергии, включает некоторый коэффициент безопасности. В действительности имеется доказательство того, что у лиц, получивших дозы ядерного излучения, значительно превышающие допустимую, нет видимых симптомов, которые бы свидетельствовали об остаточных явлениях, наблюдаемых при радиационных поражениях. Тем не менее не следует забывать, что облучение достаточно большими дозами независимо от их характера может вызвать серьезные поражения и даже смерть (см. гл. XI).

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАРАЖЕНИЕ МЕСТНОСТИ ПРИ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ

Заражение при воздушном взрыве

IX.48. Заражение поверхности земли радиоактивными веществами, образующимися при ядерных взрывах, вызывается двумя факторами. Первым фактором является наведенная радиоактивность, образующаяся при захвате нейтронов различными элементами почвы (или воды), вторым фактором является выпадение радиоактивных частиц из столба и облака, возникающих при ядерном взрыве (см. § II.21). Как относительное, так и абсолютное значение этих двух источников заражения очень сильно зависит от тротилового эквивалента и высоты взрыва. Другими факторами, влияющими на степень заражения, являются характер местности и метеорологические условия.

IX.49. При воздушном взрыве радиоактивные остатки бомбы, состоящие в основном из продуктов деления, конденсируются в виде очень мелких частиц. Наиболее мелкие из этих частиц поднимаются в стратосферу и остаются там во взвешенном состоя-

[1] В рекомендациях национального комитета по радиационной защите и измерениям, появившихся в статье «Максимально допустимая доза облучения для человека» (Radiology, 68, 260 (1957 г.), утверждается, что максимально допустимая суммарная доза при любом возрасте человека равна пятикратному числу лет сверх восемнадцатилетнего возраста при условии, что ежегодный прирост дозы не превышает 15 *бэр* и что максимально допустимая доза для всего населения Соединенных Штатов, получаемая от всех источников излучения, включая медицинские и другие искусственные источники, не должна превышать 14 млн. *бэр* на 1 миллион населения в возрасте до 30 лет; в каждом последующем десятилетии допускается одна треть упомянутого выше количества *бэр*.

нии в течение многих лет и, прежде чем осесть на поверхность земли, могут сделать несколько оборотов вокруг земного шара. В течение этого времени радиоактивные вещества подвергаются распаду и теряют свою активность. Следовательно, когда эти частицы достигнут поверхности земли, они будут сильно рассеяны, а их радиоактивность будет весьма сильно понижена; поэтому можно ожидать, что мощность дозы внешнего излучения, обусловленная выпавшими частицами, образовавшимися при взрыве ядерного делящегося заряда с тротиловым эквивалентом в несколько миллионов тонн, будет небольшой по сравнению с природными излучениями (см. гл. X).

IX.50. При определенных метеорологических условиях, а именно: при аномальных ветрах или наличии дождевых облаков, выпадение радиоактивных продуктов может иметь локальный характер. Например, при большой влажности воздуха мельчайшие радиоактивные частицы, образовавшиеся при взрыве ядерной бомбы, могут оседать на мелкие капельки воды и затем выпадать на землю в виде радиоактивного дождя. Как отмечалось в § II.98, такой случай, по-видимому, имел место во время воздушного взрыва, произведенного на относительно небольшой высоте, над лагуной Бикини в 1946 г. (испытание «Эйбл»). Радиоактивность выпавшего дождя была, однако, небольшой, так как значительная часть продуктов деления в это время находилась, вероятно, выше дождевых облаков.

IX.51. Особый интерес может представлять случай прохождения дождевого фронта, что часто имеет место в умеренных широтах. Дождевые облака могут иметь толщину до 6000 *м* и охватывать площадь, равную многим сотням квадратных километров. В этом случае выпадает обычно слабый дождь, однако он продолжается непрерывно в течение длительного времени. Если бы такое положение имело место во время проведения ядерного взрыва, то радиоактивные частицы, образованные во время взрыва, могли бы захватываться дождевыми облаками и перемещаться вместе с ними. Через короткое время радиоактивное облако взрыва, если оно не поднимется выше дождевых облаков, смешивается с последними так, что в результате образуется единая дождевая система. После образования такой системы можно ожидать выпадения радиоактивных веществ вместе с дождем на большой территории, конфигурация и размер которой определяются скоростью и направлением ветров, господствующих над этой территорией.

IX.52. Воздушный взрыв ядерной бомбы с небольшим тротиловым эквивалентом обычно не приводит к заметному радиоактивному заражению местности, за исключением, вероятно, отдельных случаев, когда имеет место сочетание особых условий. Это подтверждается фактом отсутствия поражений, вызываемых остаточным излучением при ядерных взрывах над японскими городами.

В Нагасаки в зоне ядерного взрыва радиусом 640 *м* выпало только около 0,02% продуктов деления, образовавшихся при взрыве. Такое количество продуктов деления не могло привести к заметным радиационным поражениям людей даже при длительном нахождении их на зараженной местности. Опытные данные, полученные при испытаниях ядерного оружия, указывают на то, что даже при мощных воздушных взрывах количество выпавших в районе эпицентра радиоактивных продуктов взрыва также незначительно.

IX.53. Важным источником радиоактивного заражения местности, обусловливающим остаточную ядерную радиацию при воздушном взрыве, может быть радиоактивность, наведенная нейтронами, которые захватываются ядрами элементов, главным образом натрием и магнием, находящимися на поверхности земли (см. § IX.21 и далее).

Степень радиоактивного заражения, которое может быть заметным только в ограниченном районе вокруг эпицентра взрыва, зависит от высоты и мощности взрыва, а также от времени, прошедшего с момента взрыва. Что касается взрывов в Хиросима и Нагасаки, то, как установлено, величина наведенной радиоактивности на поверхности земли была там ничтожной. При испытаниях «Эйбл» у Бикини, во время которых высота взрыва была меньше, чем в Японии, в воде образовались значительные количества радиоактивного натрия (натрий-24). Мощность дозы гамма-излучения, созданная этим изотопом на поверхности лагуны, спустя 2 часа после взрыва составляла около 1 *р/час*.

IX.54. Низкий воздушный взрыв ядерного заряда с большим тротиловым эквивалентом может создавать в районе эпицентра взрыва сильное радиоактивное заражение вследствие наведенной радиоактивности. В этом районе разрушение различных объектов, за исключением мощных подземных сооружений, вызванное ударной волной и световым излучением, должно быть фактически полным.

Заражение при наземном (надводном) взрыве

IX.55. При воздушном взрыве может иметь важное значение заражение, обусловленное радиоактивностью, наведенной нейтронами; что же касается местного заражения, вызванного радиоактивными продуктами, которые выпадают вскоре после воздушного взрыва, то это заражение обычно бывает незначительным. Продукты деления, однако, при их постепенном выпадении распространяются на обширных районах. С другой стороны, можно предположить, что при наземном (или подземном) взрыве местное выпадение радиоактивных веществ будет более значительным. Хотя вблизи центра наземного взрыва наведенная радиоактивность будет, несомненно, весьма значительной, тем не менее активность продуктов деления, выпавших в районе взрыва, будет настолько больше, что при их сравнении наведенной радиоактивностью

можно пренебречь. Поэтому последующее рассмотрение остаточной радиации, сопровождающей наземный (надводный) ядерный взрыв, будет относиться главным образом к выпадению (местному) продуктов деления.

IX.56. Доля от общего количества радиоактивных веществ, образующихся при наземном (надводном) взрыве ядерной бомбы, которая может выпасть в районе взрыва, зависит от степени соприкосновения огненного шара с поверхностью земли (воды). Эта доля тем больше, чем больше часть огненного шара, которой он касается поверхности земли, т. е. доля выпадающих в районе взрыва радиоактивных веществ возрастает с уменьшением высоты взрыва. В случае контактного взрыва, т. е. когда ядерная бомба в момент взрыва находится на поверхности земли (воды), около 50% общего количества радиоактивных веществ, образующихся при взрыве, выпадает на поверхность в пределах нескольких сотен километров от места взрыва. Остальная часть радиоактивных продуктов взрыва остается в течение длительного времени диспергированной в воздухе и в конечном итоге, как и в случае воздушного взрыва, достигает поверхности земли на расстояниях многих сотен или тысяч километров от места взрыва (см. § IX.49).

IX.57. При наземном взрыве большие количества почвы, пыли и осколков захватываются огненным шаром в период его образования. Здесь они, как было описано в § II.21, расплавляются, испаряются и перемешиваются с продуктами деления и другими радиоактивными остатками ядерной бомбы. При охлаждении этой смеси образуется огромное количество мелких частиц, которые содержат в себе радиоактивные вещества. Кроме того, при взрыве образуются значительные количества осколков и частиц размерами от больших глыб до мельчайших пылинок, на поверхности которых более или менее прочно удерживаются продукты деления.

IX.58. Более крупные (тяжелые) глыбы, вырванные и выброшенные из воронки (§ V.4), содержат значительные количества зараженных веществ. Эти глыбы не могут быть подняты в грибовидное облако и выпадают вблизи места взрыва. При слабом ветре эти глыбы выпадают приблизительно по окружности вокруг центра взрыва. В действительности центр этих окружностей, называемый **«кругом у эпицентра»**, бывает обычно несколько смещен от точки взрыва по направлению ветра.

IX.59. Большая часть зараженных веществ, о которых говорилось выше, выпадает на поверхность земли в течение короткого периода времени после взрыва продолжительностью не более часа, образуя круг заражения в районе эпицентра. В то же время мельчайшие частицы, находящиеся в пылевом столбе, поднимаются вверх на высоту до нескольких километров (см. § II.16) и могут перемещаться вместе с грибовидным облаком до тех пор, пока не начнется их выпадение. Продолжительность времени, в течение которого эти частицы достигают поверхности земли, и горизонталь-

ное расстояние, проходимое ими по направлению ветра, зависят от высоты, достигнутой ими перед началом выпадения, и их размеров, а также от характера ветра в верхних слоях атмосферы. Наиболее мелкие (самые легкие) частицы, подобно тем, которые образуются при воздушном взрыве, поднимаются в стратосферу и остаются там во взвешенном состоянии в течение длительного периода времени и, прежде чем осесть на землю, могут перемещаться по направлению ветра на многие тысячи километров от места взрыва (см. § IX.49). Большая часть более крупных частиц,

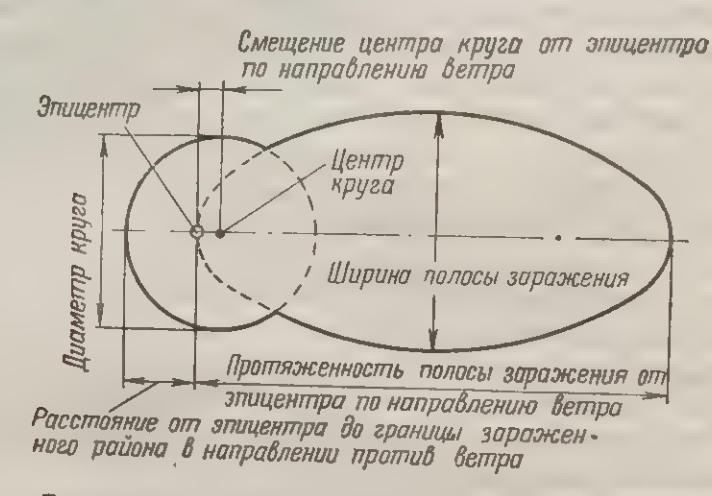


Рис. IX.61. Общая схема зараженного района

однако, достигнет поверхности земли значительно раньше, вызывая при этом локальное заражение местности в пределах нескольких сотен километров от места взрыва.

IX.60. Как правило, следует ожидать, что, за исключением мельчайших частиц, которые осаждаются на весьма обширной территории, выпадение частиц среднего и малого размеров приведет с течением времени к образованию растянутого вдоль направления ветра (сигарообразного) района заражения. Форма и размеры этого района определяются скоростями и направлениями ветра на всех высотах между поверхностью земли и вершиной радиоактивного облака. Для простоты сложный по характеру действительный ветер можно заменить эквивалентным **средним ветром**. Направление и скорость этого ветра принимаются как средние всех направлений и скоростей ветра, воздействующих на частицы во время их выпадения из радиоактивного облака на поверхность земли (см. § IX.134).

IX.61. На рис. IX.61 представлена общая схема района, зараженного радиоактивными продуктами, образующимися при ядерном взрыве, произведенном вблизи поверхности земли.

На рисунке показан круг заражения в районе эпицентра, соответствующий определенной мощности дозы (или суммарной дозе)

и определенному времени после ядерного взрыва. Центр этого круга вследствие влияния ветра несколько смещен от фактического эпицентра взрыва. Данная схема построена в предположении, что направление ветра в районе взрыва совпадает с направлением среднего ветра, определяющего выпадение радиоактивных веществ по пути движения радиоактивного облака; однако такое совпадение не всегда будет иметь место. Полная схема радиоактивного заражения в районе эпицентра взрыва, характеризующая распределение радиоактивных продуктов в этом районе, может быть представлена рядом концентрических окружностей (контуров), соответствующих определенным мощностям доз (или дозам) остаточной радиации.

IX.62. Эллипс, большая ось которого вытянута вдоль направления среднего ветра, представляет собой упрощенный контур, соответствующий данной мощности дозы в районе выпадения радиоактивных продуктов взрыва. Полная схема района радиоактивного заражения по пути распространения ядерного облака может быть представлена в виде ряда эллиптических контуров, соответствующих определенным мощностям доз (или дозам) остаточной радиации. По истечении определенного периода времени после взрыва мощность дозы (или доза), вероятно, будет тем меньше, чем больше расстояние от эпицентра взрыва. Это вызвано тем, что количество радиоактивных веществ, выпадающих на единицу площади, с увеличением расстояния от места взрыва уменьшается. В некоторых примерах (см. рис. IX.63б) эллиптическим контурам соответствуют суммарные дозы, обусловленные выпавшими к данному времени радиоактивными продуктами взрыва. Существует, кроме того, еще один фактор, приводящий к понижению мощности дозы с увеличением расстояния от места взрыва: чем больше расстояние данного места от точки взрыва, тем более продолжительное время требуется для того, чтобы радиоактивные частицы достигли этого места, а это означает, что степень радиоактивного распада частиц в этом случае будет больше. Таким образом, общая радиоактивность данного количества продуктов деления, достигших поверхности земли недалеко от места взрыва, будет значительно больше радиоактивности такого же количества продуктов деления, но выпавших позже на значительных расстояниях от места взрыва.

IX.63. Некоторое представление о конфигурациях и размерах районов, зараженных радиоактивными частицами на больших площадях в течение нескольких часов после наземного (надводного) ядерного взрыва большой мощности, может быть получено при рассмотрении схем, представленных на рис. IX.63а и б. Скорость среднего ветра принята равной 24 *км/час*. На рис. IX.63а показаны серии контуров, соответствующих произвольно выбранным округленным значениям мощностей доз, которые могут наблюдаться на местности соответственно через 1, 6 и 18 часов после

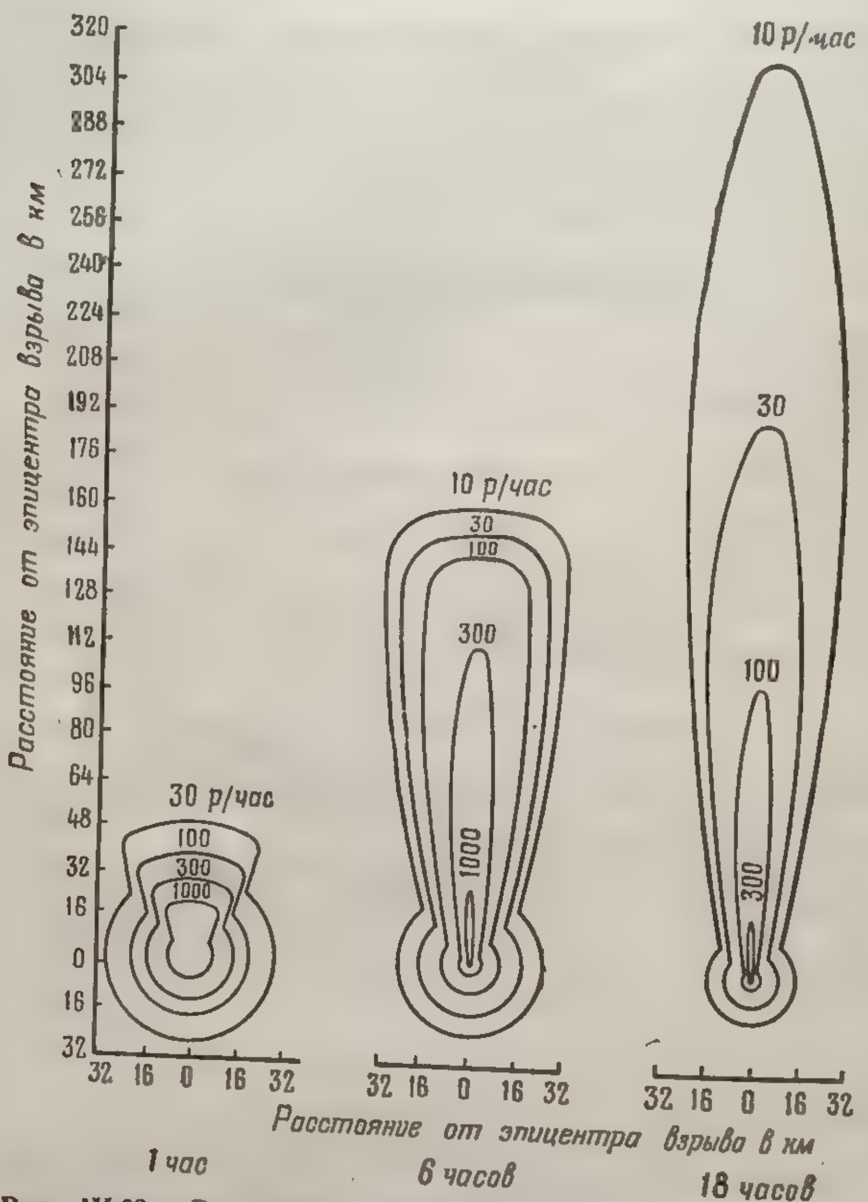


Рис. IX.63а. Различные значения мощности доз радиации, создаваемой выпавшими продуктами взрыва через 1 час, 6 часов и 18 часов после наземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в несколько миллионов тонн (средняя скорость ветра 24 *км/час*)

взрыва. На рис. IX.63б показаны серии контуров, соответствующих суммарным (или аккумулированным) дозам для тех же промежутков времени. Разумеется, изменение величины мощности дозы (или суммарной дозы) от одной контурной изолинии к другой протекает постепенно. Точно так же внешние контурные линии не выражают предельных границ района радиоактивного заражения для различных периодов времени; снижение мощности дозы будет происходить постепенно еще на некотором расстоянии за пределами этих контуров.

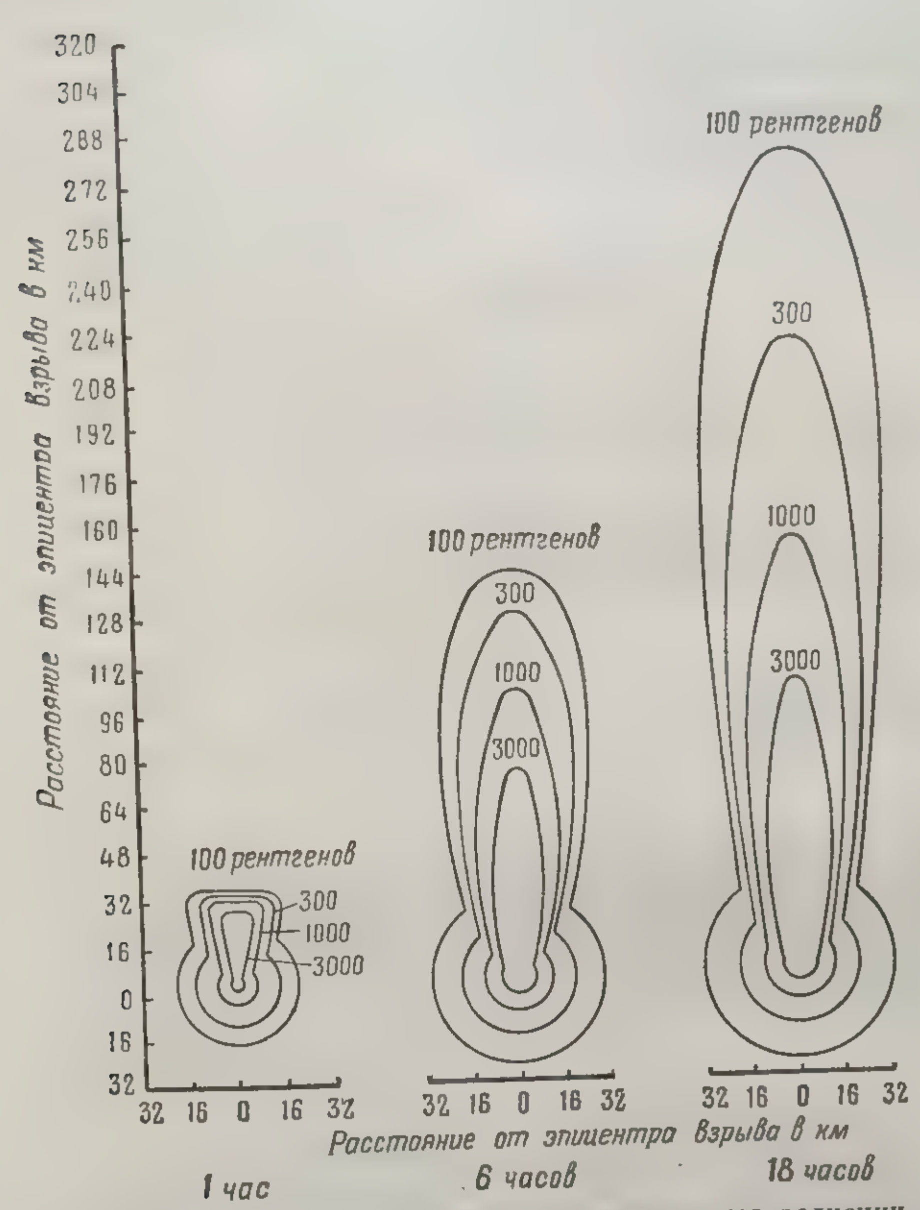


Рис. IX.63б. Различные значения суммарных доз радиации, создаваемой выпавшими продуктами деления через 1 час, 6 часов и 18 часов после наземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в несколько миллионов тонн (средняя скорость ветра 24 *км/час*)

IX.64. Рассмотрим сначала участок местности, расположенный в направлении ветра на удалении 50 *км* от эпицентра взрыва. Пусть через 1 час после взрыва мощность дозы составляет 30 *р/час*; через 6 часов после взрыва мощность дозы, которая находится между контурами, соответствующими 1000 и 300 *р/час*, увеличивается примерно до 800 *р/час*; но через 18 часов эта мощность дозы уменьшается приблизительно до 200 *р/час*. Увеличение мощности дозы в первые 6 часов после взрыва означает, что в данном месте выпадение радиоактивных продуктов в течение первого часа после взрыва еще не закончилось. Уменьшение мощности дозы в промежуток времени от 6 до 18 часов после взрыва происходит, таким образом, вследствие естественного распада продуктов деления. Из рис. IX.63б видно, что суммарная доза излучения, полученная в данном месте в течение первого часа после взрыва, является ничтожной, так как выпадение продуктов взрыва в это время только началось. Спустя 6 часов после взрыва суммарная доза достигает величины свыше 3000 *р* (вероятно, около 4000 *р*), спустя 18 часов величина этой дозы достигнет примерно 5000 *р*. Следовательно, суммарная доза продолжает со временем возрастать до предельной величины, но с постепенно уменьшающейся скоростью (см. § IX.14).

IX. 65. Рассмотрим далее участок местности, расположенный в направлении ветра на удалении 160 *км* от эпицентра взрыва. Через 1 час после взрыва величина мощности дозы, как показано на рис. IX.63а, здесь будет ничтожной (вероятно, даже будет равна нулю), так как выпадающие радиоактивные частицы еще не достигли рассматриваемой точки. Через 6 часов мощность дозы составит 10 *р/час*, а через 18 часов — около 50 *р/час*. Выпадение радиоактивных продуктов взрыва начинается несколько раньше, чем через 6 часов после взрыва, и в основном заканчивается через 18 часов, хотя установление этого факта непосредственно из приведенных контуров весьма затруднительно. Суммарная доза, как это видно из рис. IX.63б, через 1 час после взрыва равна нулю, через 6 часов — примерно 30 и через 18 часов — почти 1000 *р*.

Величина аккумулированной (суммарной) дозы за длительное время на этом участке будет меньше, чем на любых других участках, расположенных ближе к эпицентру взрыва. Это вытекает из того, что количество продуктов деления, достигающих поверхности земли, с увеличением расстояния от места взрыва уменьшается.

IX.66. В общем, прежде чем начнется выпадение радиоактивных продуктов в любом данном районе, расположенном на некотором расстоянии от места взрыва, должно пройти определенное время. Это время зависит от расстояния до эпицентра взрыва, высоты, с которой начинается выпадение радиоактивных частиц, и скорости среднего ветра. Когда выпадение радиоактивных продук-

тов взрыва только начинается, мощность дозы излучения в это время незначительна, однако по мере оседания этих продуктов величина мощности дозы непрерывно увеличивается. Через несколько часов выпадение зараженных частиц в основном заканчивается (хотя и не окончательно), и после этого вследствие радиоактивного распада продуктов деления начинается непрерывное понижение мощности дозы. До начала выпадения частиц суммарная доза излучения равна нулю, но после начала выпадения радиоактивных осадков эта доза будет постоянно расти, сначала быстро, а затем все медленнее и медленнее (см. табл. IX.90); при этом возрастание суммарной дозы будет продолжаться в течение длительного периода времени, охватывающего многие месяцы и даже годы.

Взрывы ядерных зарядов с небольшим тротиловым эквивалентом

IX.67. Характер явлений, связанных с выпадением радиоактивных осадков при наземном взрыве ядерного заряда с небольшим тротиловым эквивалентом, является по существу таким же, как и для случая взрыва заряда большой мощности. Различие носит скорее количественный, чем качественный характер. Общее количество продуктов деления пропорционально в основном тротиловому эквиваленту заряда, поэтому с увеличением тротилового эквивалента ядерного заряда увеличиваются как размеры заражаемого района, так и степень его заражения. При ядерном взрыве малой мощности степень и размеры радиоактивного заражения будут меньшими. Однако для того чтобы дать более полное представление о форме, размерах и степени радиоактивного заражения, ниже приводятся результаты, полученные при наземных взрывах ядерных зарядов с тротиловым эквивалентом порядка нескольких тысяч тонн. В следующем разделе для сравнения приводятся такие же данные для взрывов ядерных зарядов с тротиловым эквивалентом в несколько миллионов тонн.

IX.68. Программа испытательных взрывов ядерного оружия в штате Невада предусматривала детальное изучение радиоактивного заражения местности в непосредственной близости от места взрыва. Общая схема контуров заражения в большинстве случаев не отличалась от схемы, показанной на рис. IX.61. Для целей планирования полезно иметь усредненные контуры этого типа. В табл. IX.68 приведены размеры контуров различных мощностей доз (эталонных), которые получались бы через 1 час после наземного взрыва с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* при скорости среднего эффективного ветра 24 *км/час*. Как указано в § IX.9, такие значения мощностей доз определены на основе измерений уровней радиации, произведенных после окончания выпадения радиоактивных осадков.

Таблица IX.68

Приблизительные размеры контуров эталонных мощностей доз остаточного излучения, которые наблюдались бы на поверхности земли через 1 час после наземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т* при условии полного выпадения всех радиоактивных продуктов взрыва

Мощность дозы, *р/час*	Радиус круга заражения в районе эпицентра взрыва, *км*	Смещение центра круга заражения от эпицентра, *км*	Расстояние по направлению ветра, *км*	Расстояние перпендикулярно направлению ветра, *км*
3000	0,16	0,13	1,6	0,48
1000	0,35	0,22	3,7	1,9
300	0,65	0,35	8,5	1,9
100	1,05	0,45	18,4	2,9
30	1,53	0,57	35	4,5
10	2,25	0,67	80	8,1

IX.69. Очевидно, величина мощности дозы вблизи эпицентра взрыва, особенно в районе воронки, будет очень большой, и этот район следует считать непригодным для пребывания в нем людей ввиду опасного уровня излучения. Однако упомянутый район и без этого был бы непригодным для жилья вследствие полного разрушения, вызываемого воздушной ударной волной и волной сжатия в грунте, а также вследствие образования воронки.

IX.70. Кроме заражения вблизи эпицентра взрыва, соответствующего кругу заражения в районе эпицентра (см. рис. IX.61), как в Аламагордо, так и в штате Невада в нескольких километрах от эпицентра взрыва были обнаружены районы с несколько повышенной радиоактивной зараженностью по сравнению с окружающими участками (так называемые «горячие пятна»). Такое выпадение радиоактивных продуктов является, по всей вероятности, следствием специфического сочетания метеорологических, атмосферных и местных условий, приводящих к усиленному заражению данного района.

Взрывы ядерных зарядов с большим тротиловым эквивалентом

IX.71. В табл. IX.71 приведены размеры контуров ряда гипотетических (эталонных) мощностей доз (через 1 час) для наземного взрыва делящегося заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* при полном выпадении радиоактивных веществ. Скорость среднего ветра принята равной 24 *км/час*. Как и ранее, данные получены из графика распада продуктов деления (см. рис. IX.8) или равнозначного математического выражения для эталонной мощности дозы. Это выражение получено в предположении, что через 1 час после взрыва выпадение радиоактивных осадков в данном месте полностью закончилось. Протяженность любого контура в направ-

лении против ветра, приведенная в таблице, определяется вычитанием из величины радиуса круга заражения, образованного у эпицентра взрыва, величины смещения центра круга. Например, протяженность эталонного контура (соответствующего 10 *р/час*) от эпицентра против направления ветра равна: 17,6 — 2,64 = 14,96 *км*.

Таблица IX.71

Приблизительные размеры контуров эталонных мощностей доз остаточного излучения, которые наблюдались бы на поверхности земли через 1 час после наземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* при полном выпадении всех радиоактивных продуктов взрыва

Мощность дозы, *р/час*	Радиус круга заражения в районе эпицентра взрыва, *км*	Смещение центра круга заражения от эпицентра, *км*	Расстояние по направлению ветра, *км*	Расстояние перпендикулярно направлению ветра, *км*
3000	0,69	0,96	35,2	4,96
1000	2,24	1,24	64,0	10,9
300	4,5	1,60	112	18,9
100	7,5	2,0	182	26,8
30	12,0	2,34	293	36,5
10	17,6	2,64	508	54,5

IX.72. На рис. IX.72 изображена идеальная схема распределения эталонных мощностей доз (через 1 час после взрыва) для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* и скорости среднего эффективного ветра, равной 24 *км/час*. Ввиду отсутствия полной симметричности как в отношении рельефа местности, так и в отношении действия ветров эллиптические контуры, характеризующие остаточное излучение, будут несколько отличаться от показанных на рис. IX.72. Однако для целей иллюстрации эти контуры, как и схема, показанная на рис. IX.61, представлены в идеализированном виде.

IX.73. Крайне важно правильно оценить значение контуров, изображенных на рис. IX.72. Тот факт, что приведенные на схеме эталонные значения мощностей доз охватывают такое большое расстояние от эпицентра, не следует понимать в том смысле, что такие мощности доз реально будут существовать через час после взрыва. Фактически, конечно, выпадение радиоактивных осадков за это время произойдет только на очень небольшой части показанной на схеме площади. Из § IX.64 и последующих параграфов следует, что выпадение радиоактивных веществ на большей части изображенной на схеме площади начнется только через несколько часов после взрыва. Тем не менее гипотетическая (эталонная) мощность дозы является весьма полезной при проведении расчетов; это показано на примере, который основывается на данных, приведенных на рис. IX.72.

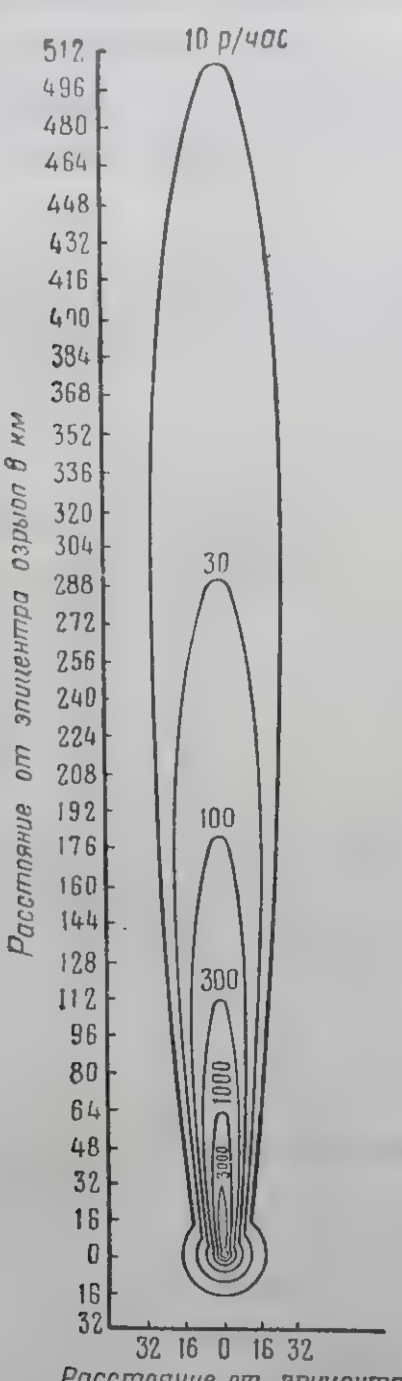


Рис. IX.72. Значения мощностей доз радиации (при идеальных контурах) через 1 час после наземного взрыва с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* (средняя скорость ветра 24 *км/час*)

На рис. IX.72 изображены контуры, соответствующие различным значениям эталонной мощности дозы (через 1 час после взрыва) для наземного взрыва делящегося ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*. Скорость среднего ветра составляет 24 *км/час*.

Метод расчета. Для взрывов ядерных зарядов, тротиловый эквивалент которых меньше или больше 1 млн. *т*, можно воспользоваться следующим приближенным законом подобия:

$$R = R_0 W^{1/3} \quad \text{при} \quad d = d_0 W^{1/3},$$

где R_0 — мощность дозы (эталонная) на расстоянии d_0 через 1 час после взрыва делящегося заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*;

R — мощность дозы (эталонная) на расстоянии d через 1 час после взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W млн. *т*.

Пример. Дано: взрыв делящегося ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 10 млн. *т* произведен на поверхности земли.

Определить величину мощности дозы от радиоактивных осадков на удалении 345 *км* от центра взрыва по направлению ветра в момент выпадения в этой точке радиоактивных веществ; скорость среднего ветра 24 *км/час*.

Решение: Так как $W = 10$, то $W^{1/3} = 10^{1/3} = 2{,}15$. Расстояние $d = 345$ *км*, следовательно, $d_0 = \frac{d}{W^{1/3}} = \frac{345}{2{,}15} = 160$ *км*.

Из рис. IX.72 видно, что при наземном взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т* значение R_0 на расстоянии 160 *км* по направлению ветра от центра взрыва составляет примерно 150 *р/час*. Отсюда эталонная мощность дозы на расстоянии 345 *км* через 1 час после взрыва делящегося ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 10 млн. *т* будет

$$R = 150 \times 2{,}15 = 322 \ р/час.$$

Выпадение радиоактивных осадков на расстоянии 345 *км* от центра взрыва начнется через $\frac{345}{24} = 14{,}3$ часа после взрыва. Из рис. IX.8 видно, что для времени, равного 14,3 часа, коэффициент распада равен 0,04. Поэтому искомая величина — мощность дозы на расстоянии 345 *км* по направлению ветра от центра взрыва — во время выпадения радиоактивных осадков будет $322 \times 0{,}04 = 12{,}9$ *р/час*.

Метод расчета мощностей доз остаточного излучения

IX.74. Контуры, представляющие собой изодозы остаточного излучения вблизи центра наземного взрыва, для любого значения тротилового эквивалента могут быть построены на основе приближенных законов подобия с использованием данных, приведенных в табл. IX.68 и IX.71 (или на рис. IX.72). Для простоты предположим, что скорость и направление среднего ветра являются одинаковыми во всех случаях над всем районом выпадения радиоактивных осадков. Если мощность дозы (эталонная) через 1 час после наземного взрыва делящегося заряда с тротиловым эквивалентом W млн. *т* на расстоянии d от эпицентра составляет R *р/час*, то согласно приближенному закону подобия

$$R = R_0 W^{1/3} \text{ для расстояния } d = d_0 W^{1/3},$$

где R_0 — мощность дозы (эталонная) через час после взрыва на расстоянии d_0 от центра наземного взрыва делящегося заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*.

Тот же самый закон подобия может быть применен также для определения любой другой характеристики контура, например радиуса круга заражения в районе эпицентра, величины смещения центра круга заражения от эпицентра, а также расстояний по направлению ветра и поперек направлений ветра.

IX.75. Другими словами, контуры для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом W млн. *т* можно построить на основе результатов, полученных посредством умножения данных, приведенных в табл. IX.71, включая расстояния и мощности доз, на множитель $W^{1/3}$. Этот простой закон кубического корня, как установлено, дает вполне удовлетворительные результаты в случае, когда тротиловый эквивалент ядерного заряда находится в пределах от 100 тыс. до 10 млн. *т*. Для тротиловых эквивалентов менее 100 тыс. *т* расчет необходимо производить аналогичным образом, исходя из данных, приведенных в табл. IX.68 для наземного взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*. В этом случае контурные изолинии, образующиеся при взрыве с тротиловым эквивалентом W тыс. *т*, могут быть построены на основе результатов, полученных умножением данных, приведенных в табл. IX.68 (включая мощности доз), на множитель $(W/20)^{1/3}$. В общем, если радиоактивное облако не достигает тропосферы или незначительно деформируется ею, расчет следует производить на основе данных, приведенных для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*. Однако в случае, когда атомное облако достигает тропосферы, расчет на основе

данных табл. IX.71 или рис. IX.72 (для взрыва ядерного заряда с тротиловым эквивалентом 1 млн. *т*) дает лучшие результаты.

IX.76. Описанный выше метод приближенного расчета применим при условии, когда скорость среднего ветра в течение всего периода выпадения радиоактивного осадка составляет 24 *км/час*. В случае если фактическая скорость среднего ветра является иной, можно внести приблизительную поправку; особенно это имеет значение для значительных расстояний от эпицентра взрыва. Способ внесения поправки показывается на примере. Предположим, что при скорости среднего ветра 24 *км/час* контур некоторой эталонной мощности дозы простирается по направлению ветра на 192 *км*; тогда при скорости среднего ветра 32 *км/час* соответствующее расстояние для той же эталонной мощности будет примерно равно: $32/24 \cdot 192 = 256$ *км*.

IX.77. Приведенные выше результаты (см. § IX.71 и далее) основаны на допущении, что тротиловый эквивалент взрыва, обусловленный делением ядер атомов заряда, и общий тротиловый эквивалент взрыва равны между собой. Последнее имело бы место, если бы вся энергия взрыва выделялась только в процессе деления. Однако в некоторых мощных видах оружия часть энергии выделяется за счет термоядерных реакций (реакций синтеза), которые не приводят к повышению радиоактивности выпадающих продуктов взрыва (§ I.13, I.53). Поправка, учитывающая этот факт, может быть внесена следующим способом. Допустим, что общая энергия взрыва эквивалентна энергии взрыва W млн. *т* тротила, а доля энергии, обусловленная процессом деления, составляет f. В этом случае расчет производится, как было указано для взрыва делящегося заряда, с тротиловым эквивалентом W млн. *т*. Умножая затем эталонную мощность дозы для любого заданного расстояния на величину f, получаем искомую эталонную мощность дозы на этом же расстоянии.

Факторы, определяющие форму и размеры контуров радиоактивного заражения

IX.78. Форма и размеры контуров радиоактивного заражения вблизи эпицентра взрыва могут быть предсказаны с достаточной для практики точностью. Предсказать же точно схему выпадения мелких частиц, имеющихся в радиоактивном облаке взрыва по пути его движения, практически невозможно. Кроме таких очевидных переменных факторов, какими являются тротиловый эквивалент и высота взрыва, важную роль играют метеорологические условия и сложная система ветров на различных высотах, например на высоте от 24 000 до 30 000 *м* от уровня земли. Ниже будет

показано (§ IX.133), что влияние ветра на общее направление распространения радиоактивных продуктов взрыва может быть учтено с известной степенью приближения и что контуры, представленные на рис. IX.72, учитывают это влияние в упрощенном виде. Однако всегда необходимо считаться с возможностью резкого и неожиданного изменения господствующих ветров на больших высотах, что уже иногда имело место при испытаниях ядерного оружия.

IX.79. Одним из факторов, в отношении которого имеется много неясностей, но который играет важную роль в определении характера радиоактивного заражения местности, является размер частиц, содержащихся в облаке взрыва. Диаметр многих из этих частиц составляет тысячные доли сантиметра (или менее); выпадение таких частиц на поверхность земли может продолжаться сутки или даже больше. За это время эти частицы перемещаются на несколько сотен километров от места взрыва. Таким образом, радиоактивные выпадения могут вызвать серьезное заражение местности на таких расстояниях от ядерного взрыва, на которых все другие поражающие факторы, такие, как воздушная ударная волна и волна сжатия грунта, световое излучение и начальная ядерная радиация, не оказывают поражающего воздействия.

IX.80. Необходимо учитывать, что чем большее время частицы радиоактивного облака остаются в воздухе, тем меньше их радиоактивность при достижении поверхности земли. Однако общее количество радиоактивных продуктов, образующихся при наземном ядерном взрыве большой мощности (с тротиловым эквивалентом порядка нескольких миллионов тонн), настолько велико, что их активность может оставаться значительной даже после того, как она с течением времени уменьшится. Именно поэтому, а также потому, что радиоактивное заражение, вызываемое остаточной радиацией ядерного взрыва, охватывает огромные площади, она должна рассматриваться как один из важнейших поражающих факторов ядерного оружия.

IX.81. Если бы радиоактивное облако состояло в основном из крупных частиц, то при прочих одинаковых условиях, например таких, как тротиловый эквивалент и высота взрыва, распределение скорости и направления ветра по высоте, это привело бы к сильному заражению района, площадь которого была бы сравнительно небольшой. С другой стороны, если бы бóльшая часть частиц имела очень малый размер, зараженная площадь была бы значительно больше, хотя интенсивность излучения, особенно в отдаленных от эпицентра взрыва районах, была бы не так велика, хотя по абсолютной величине она могла бы быть достаточной, чтобы создать опасность поражения.

IX.82. Отсюда очевидно, что размеры и конфигурация контуров в сильной степени зависят от распределения по размерам частиц в облаке ядерного взрыва. Это распределение в свою очередь за-

висит от характера местности; при этом необходимо заметить, что последняя зависимость до настоящего времени изучена еще недостаточно. Несомненно, что наземный взрыв в городе по сравнению с открытой местностью приведет к совершенно иному распределению зараженных частиц по размерам и, следовательно, к иному распределению радиоактивных осадков на поверхности земли. Во всяком случае, характер поверхности как в городе, так и на открытой местности, по всей вероятности, оказывает влияние на размеры и форму частиц, вовлекаемых в радиоактивное облако ядерного взрыва.

IX.83. В идеальном случае, как показано на рис. IX.72, контуры, соответствующие определенным уровням заражения, будут иметь эллиптическую (или сигарообразную) форму, вытянутую от центра взрыва по направлению ветра, причем большая ось эллипса будет направлена в сторону среднего ветра. Если во время перемещения частиц от эпицентра взрыва происходит изменение ветра как по направлению, так и по скорости, контуры могут оказаться изогнутыми и принимать форму банана или бумеранга. Однако даже при правильной эллиптической форме контуров мощности доз на различных расстояниях будут зависеть от влияния всех упомянутых выше факторов, изменяясь по величине в зависимости от реальных условий.

IX.84. Выше уже отмечалось (см. § IX.70), что при определенном сочетании условий, зависящих от состояния атмосферы и характера местности, в некоторых местах часто может наблюдаться радиоактивное заражение с более высокими уровнями («горячие пятна»). Таким образом, можно ожидать, что интенсивность излучения в районе сильного радиоактивного заражения будет на различных его участках неодинаковой; поэтому контуры, изображенные на рис. IX.72, являются идеализированными, поскольку они предполагают постепенное и равномерное снижение мощности дозы по мере удаления от центра взрыва. Эти контуры представляют собой усредненную схему радиоактивного заражения, интенсивность которого может изменяться в зависимости от метеорологических условий (ветры, дождь, снег и т. д.). Сильные ветры у поверхности земли, способствующие распространению радиоактивных осадков в приземном слое атмосферы, могут привести к уменьшению зараженности некоторых участков; эти же ветры могут также вызвать перемещение радиоактивных частиц в ранее незараженный (или слабо зараженный) район. Возможное влияние дождя во время воздушного взрыва было рассмотрено в § IX.50. Аналогичные условия могут также повлиять на характер распределения радиоактивных выпадений и в случае наземного взрыва.

IX.85. Другой особенностью радиоактивных выпадений, которая не учтена схемой, изображенной на рис. IX.72, является вредное воздействие бета-частиц при попадании их на кожу. Величины доз, показанные на этой схеме, обусловлены в основном гамма-

излучением осколков деления и других продуктов ядерного взрыва. Если радиоактивная пыль попадает на кожу и остается на ней в течение некоторого более или менее продолжительного времени, то бета-частицы, помимо других последствий, обусловленных радиоактивным облучением (см. гл. XI), могут также вызвать серьезные ожоги кожи.

Радиоактивное заражение, обусловленное взрывом большой мощности, произведенным 1 марта 1954 г.

IX.86. Изложенный выше материал можно дополнить данными наблюдений над радиоактивным заражением Маршалловых островов, образовавшимся в результате испытательного взрыва большой мощности, произведенного у атолла Бикини 1 марта 1954 г.[1].

Ядерное устройство было взорвано на коралловом острове, и образовавшиеся в результате этого взрыва радиоактивные продукты, состоявшие из частиц диаметром 0,001—0,02 *см*, вызвали сильное заражение местности. Зараженный район имел сигарообразную форму, его размеры составляли по направлению ветра 350 *км* (от центра взрыва), в направлении против ветра — 32 *км* и в поперечном направлении — 65 *км*. Общая площадь зараженной территории составляла свыше 18 000 *км*^{2}; радиоактивное заражение было настолько сильным, что для жизни людей оно представляло бы безусловную опасность, для предотвращения которой потребовалась бы их эвакуация с этой территории или принятие других мер.

IX.87. На основе измерений суммарных доз излучения, произведенных рядом дозиметрических станций, а также исходя из расчетов, основанных на известных физических данных и ранее накопленного опыта, удалось довольно точно определить несколько контуров, характеризующих распределение на поверхности земли выпавших радиоактивных осадков. Эти контуры в несколько идеализированном виде показаны на рис. IX.87. Суммарные дозы остаточного гамма-излучения в рентгенах, которым соответствуют данные контуры, подсчитаны для периода времени продолжительностью 36 часов (после взрыва) по данным полевых дозиметрических измерений. Эти дозы представляют собой максимально возможные суммарные дозы, которые могли бы быть получены неукрытыми людьми, находящимися на открытой местности в течение всего этого времени. Пребывание внутри зданий или эвакуация из

---

[1] Действие ядерных взрывов большой мощности (The effects of High Yield Nuclear Explosions). Доклад Комиссии по атомной энергии США, февраль 1955 г.

Рис. IX.87. Значение суммарных доз радиации (при идеальных контурах) пю истечении 36 часов после ядерного взрыва большой мощности, произведенного 1 марта 1954 г. у атолла Бикини

зараженного района уменьшили бы величину полученной дозы. С другой стороны, люди, остающиеся в данном районе более чем 36 часов после взрыва, получили бы еще большие дозы остаточного излучения.

IX.88. Доза излучения в 700 *р*, полученная в течение 36 часов, по всей вероятности, почти в 100% случаев будет смертельной. Отсюда, по-видимому, следует, что после испытательного взрыва 1 марта 1954 г. полоса длиной в направлении ветра 225 *км* и шириной до 32 *км* была настолько заражена радиоактивными выпадениями, что они представляли бы серьезную опасность для жизни почти всех людей, которые оставались бы в этом районе вне укрытий по крайней мере в течение 36 часов после взрыва. На расстоянии 350 *км* и более по направлению ветра число смертельных случаев, вызванных остаточным излучением, было бы незначительно, но, по-видимому, на этом расстоянии наблюдалось бы много случаев заболеваний лучевой болезнью, приводящей к временной нетрудоспособности.

IX.89. Период времени — 36 часов, для которого на рис. IX.87 приводятся суммарные дозы радиации, выбран несколько произвольно на основе предположения, что за это время большая часть радиоактивных частиц, содержащихся в воздухе над данным районом, успеет осесть на землю. Следует отметить, однако, что, как уже не раз указывалось в этой главе, излучения, исходящие от продуктов деления, будут продолжаться в течение длительного времени, но с непрерывно убывающей интенсивностью. Представления о влиянии продолжительности внешнего гамма-облучения можно получить, рассмотрев два различных участка, которые были заражены в результате испытательного взрыва, произведенного 1 марта 1954 г. на атолле Ронгелап (Маршалловы острова). Выпадение радиоактивных веществ началось через 4—6 часов после взрыва и продолжалось в течение нескольких часов.

IX.90. На северо-западной оконечности атолла, на удалении 160 *км* от места взрыва, суммарная доза, полученная в течение первых 36 часов после начала выпадения радиоактивных веществ, составила 2300 *р*. Это было наиболее интенсивное выпадение, зарегистрированное когда-либо на таком расстоянии от места взрыва. Примерно в 40 *км* южнее и в 180 *км* от эпицентра взрыва суммарная доза для этого же времени составляла только 150 *р*. Жители атолла Ронгелап, находившиеся в этом районе до их эвакуации в течение 44 часов с момента начала выпадения радиоактивных осадков (см. § XI.47), получили суммарную дозу в 175 *р*. Максимальные теоретически возможные дозы излучения для этих двух районов атолла для различных промежутков времени после взрыва, вычисленные согласно общепринятому закону радиоактивного распада (см. § IX.7, IX.112), приведены в табл. IX.90.

Таблица IX.90

Вычисленные дозы излучения, обусловленного радиоактивными выпадениями на двух участках местности на атолле Ронгелап после испытательного взрыва у атолла Бикини 1 марта 1954 г.

Время облучения после взрыва	Суммарная доза за данное время, *р*	
	населенный район	ненаселенный район
Первые 36 часов	140	2150
От 36 часов до 1 недели	101	1310
От 1 недели до 1 месяца	73	950
От 1 месяца до 1 года	83	1080
Всего за 1 год	397	5490
От 1 года до неопределенно-длительного времени	Около 129	Около 1680

IX.91. Следует подчеркнуть, что в табл. IX.90 указаны максимально возможные в данной местности вычисленные суммарные дозы. При подсчете их значений предполагалось, что люди, подвергающиеся облучению, находятся вне укрытий (на открытой местности) в течение 24 часов в сутки (см. § XII.81 и далее). Кроме того, данные таблицы не учитывают влияния условий погоды (например, проникание радиоактивных веществ в почву, вызванное дождем, возможное рассеивание частиц ветром), которые могут привести к уменьшению уровня заражения. Мощности доз, измеренные в некоторых районах Маршалловых островов, на 25-й день после взрыва оказались примерно на 40% меньше вычисленных. Известно, что на третьей неделе там прошли дожди, и этим, вероятно, объясняется значительное уменьшение уровней радиации.

IX.92. Следует также отметить, что схема выпадения радиоактивных веществ в районе атолла Бикини (рис. IX.87), а также схема распределения эталонных мощностей доз (рис. IX.72) могут рассматриваться как более или менее типичные, поэтому ими можно пользоваться для практических целей. Следует только иметь в виду, что они не могут служить в качестве абсолютного руководства. Конкретная обстановка, сложившаяся на Маршалловых островах, явилась результатом сочетания таких факторов, как мощность и высота взрыва, характер местности в районе взрыва, распределение ветров и другие метеорологические условия. Изменение любого из этих факторов могло бы значительно повлиять на схему заражения, вызванного радиоактивными выпадениями.

IX.93. Таким образом, показанная на рис. IX.87 схема радиоактивных выпадений представляет собой возможную, но не обязательную схему того, что происходит после наземного взрыва

делящегося заряда с большим тротиловым эквивалентом. Общее направление выпадения радиоактивных веществ можно определить довольно легко, если известна система ветров. Однако взрыв или его высота в случае ядерного нападения противника представляют собой факторы, не поддающиеся предвидению. Поэтому невозможно заранее определить, насколько далеко будет простираться сильно зараженная площадь, хотя время начала радиоактивных выпадений в любой точке может быть вычислено, если известна скорость среднего ветра и его направление.

IX.94. Несмотря на некоторые неясности, которые встречаются при построении точной схемы выпадения радиоактивных веществ, из приведенных выше данных можно сделать некоторые крайне важные выводы. Один из них заключается в том, что при некоторых условиях остаточная ядерная радиация может представлять серьезную опасность на значительном расстоянии от места ядерного взрыва и далеко за пределами радиусов действия воздушной ударной волны и волны сжатия грунта, а также светового и начального ядерного излучений. Второй вывод состоит в том, что практически возможно разработать план мероприятий, направленных на уменьшение этой опасности; однако эти планы должны быть гибкими, для того чтобы они могли быстро видоизменяться в соответствии с конкретной обстановкой, возникающей после ядерного нападения.

Радиологическая война

IX.95. В течение некоторого времени рассматривался вопрос о возможности использования заранее приготовленных радиоактивных веществ в качестве наступательного оружия, т. е. вопрос о так называемой радиологической войне. Основная идея здесь заключается в том, что радиоактивное заражение местности, промышленных предприятий и оборудования приведет к тому, что их использование будет либо невозможным, либо крайне опасным, причем такое заражение не будет сопровождаться разрушением материальных ценностей.

Для большей эффективности используемые в качестве боевых средств радиоактивные вещества должны испускать гамма-излучение и обладать периодом полураспада в несколько недель или месяцев. Радиоактивные изотопы с длительным периодом полураспада испускают излучение малой интенсивностью; для того чтобы они могли быть эффективными, их необходимо применять в очень больших количествах. Изотопы с коротким периодом полураспада распадаются слишком быстро и поэтому не могут проявлять свое вредное воздействие в течение длительного времени.

IX.96. Даже если бы удалось подобрать радиоактивный изотоп, обладающий нужными свойствами с несложной технологией производства, в качестве боевого радиоактивного средства, разре-

шение проблемы производства, обращения и доставки этого изотопа, обладающего интенсивным гамма-излучением, к цели представляло бы значительную трудность. Кроме того, значительную трудность представляет собой проблема хранения запасов радиоактивных веществ. Другие виды оружия могут быть произведены заранее и могут храниться готовыми к использованию при чрезвычайных обстоятельствах. Их можно хранить в течение длительного времени без ущерба для их качества. Этого нельзя сказать о средствах радиологической войны, так как благодаря естественному распаду будет происходить непрерывная потеря их активности. Производство специфического изотопа представляет собой трудоемкий процесс, и поэтому непрерывное и неизбежное снижение его активности является серьезным недостатком.

IX.97. Положение изменилось в связи с разработкой бомб, образующих при взрыве большое количество продуктов деления. Взрыв такой бомбы на небольшой высоте может привести к радиоактивному заражению больших площадей, лежащих за пределами механических разрушений. Поэтому эти бомбы по существу являются оружием радиологической войны. Вместо того чтобы производить и хранить средства радиологической войны заранее, со всеми сопутствующими этому трудностями, проще применять ядерное оружие взрывного действия; в этом случае радиоактивные вещества образуются в результате деления в момент ядерного взрыва. Радиологическая война стала, таким образом, автоматическим дополнением к наступательному использованию ядерного оружия взрывного действия большой мощности.

Заражение площадей

IX.98. В § IX.95 указывалось, что радиоактивное заражение может превратить значительные территории в непригодные для использования на длительный период времени. Подобное заражение вызывает два следствия, которые необходимо рассмотреть. Первое следствие заключается в непосредственном вредном воздействии излучения на людей, которым приходится жить и работать в зараженном районе; второе проявляется косвенно в результате потребления продовольствия, производимого в зараженном районе. Методы расчета доз облучения, обусловленного продуктами деления при условии отсутствия защитных средств, приведены выше в этой главе (см. также рис. XII.107 и XII.108). Эти методы позволяют определить время, в течение которого можно оставаться на данной местности при условии, что установлен какой-то предел допустимой суммарной дозы облучения. Величину такой предельной дозы нельзя устанавливать заранее, поскольку она целиком будет зависеть от условий, определяющих конкретную обстановку.

IX.99. В зараженных сельских местностях опасность поражения может быть уменьшена путем перепахивания верхнего слоя почвы, в результате которого выпавшие на поверхность радиоактивные частицы попадают в нижний почвенный слой. Однако в связи с этим может появиться опасность попадания радиоактивных продуктов взрыва в растения, а следовательно, и в организм человека с пищей.

Известно, что одни элементы усваиваются растениями легче, а другие труднее. Процесс усвоения этих элементов зависит в основном от характера почвы, а также от некоторых других факторов. В настоящее время эта в высшей степени сложная проблема детально изучается с целью определения степени опасности, возникающей вследствие усвоения продуктов деления растениями, а также с целью разработки способов уменьшения этой опасности.

Заражение при подземных (подводных) взрывах

IX.100. Степень заражения, вызванного радиоактивными продуктами, образовавшимися при подземном взрыве, зависит главным образом от глубины, на которой произошел взрыв. Если взрыв произойдет на достаточно большой глубине, то радиоактивные продукты деления и неразделившиеся остатки вещества заряда, а также радиоактивные продукты, образовавшиеся при захвате нейтронов, в атмосферу не попадут. После такого взрыва сколько-нибудь значительного выпадения радиоактивных веществ не произойдет. С другой стороны, если взрыв произойдет на небольшой глубине и при этом огненный шар прорвется наружу, то последствия такого взрыва, поскольку речь идет о радиоактивных выпадениях, будут немногим отличаться от последствий наземного (надводного) взрыва.

IX.101. В действительности будет наблюдаться постепенный переход от явлений, сопровождающих воздушный взрыв на большой высоте, когда почти все радиоактивные продукты взрыва рассеиваются в атмосфере, к явлениям, наблюдающимся при взрыве на большой глубине, когда все радиоактивные вещества остаются в земле (воде). Между этими двумя крайними видами взрывов находятся наземные (надводные) взрывы и воздушные взрывы на небольшой высоте, сопровождающиеся значительным заражением местности, обусловленным выпадением радиоактивных веществ. Эти взрывы в свою очередь по характеру производимого ими заражения аналогичны взрывам на небольшой глубине. С увеличением глубины взрыва все бóльшая часть радиоактивных продуктов остается вблизи места взрыва, т. е. внутри воронки или возле нее, вследствие чего пропорционально меньшая часть этих продуктов поднимается в верхние слои атмосферы, откуда они потом выпадают вдали от места взрыва.

IX.102. Поскольку взрыв на небольшой глубине, когда огнен-

ный шар вырывается из земли, в основном аналогичен низкому воздушному взрыву, при котором бо́льшая часть огненного шара касается поверхности земли, нет необходимости рассматривать далее взрывы этого типа. Особый интерес, однако, представляет случай взрыва на такой глубине, при которой огненный шар не вырывается наружу, но, тем не менее, значительное количество земли (или воды) выбрасывается в воздух в виде столба (см. § II.67).

IX.103. Следует отметить, что некоторое усиление остаточной ядерной радиации после подземного (подводного) взрыва происходит за счет радиоактивных изотопов, например натрия-24 (см. § IX.21), образующихся в результате захвата нейтронов. Однако так же, как и в случае наземного (надводного) взрыва, это излучение настолько незначительно по сравнению с излучениями от продуктов деления, что им можно пренебречь.

IX.104. Подземный взрыв на небольшой глубине приводит к образованию значительной воронки. Большая часть радиоактивных веществ остается в районе воронки отчасти из-за того, что эти вещества не вырываются наружу, и отчасти из-за того, что крупные зараженные куски и обломки, выброшенные в воздух, выпадают вблизи места взрыва. Более мелкие частицы, образующиеся непосредственно при взрыве или находящиеся в базисной волне (см. § II.71), останутся в воздухе во взвешенном состоянии и выпадут на некотором расстоянии от центра взрыва.

IX.105. Схема распределения контурных линий, характеризующих радиоактивное выпадение, будет зависеть от тротилового эквивалента делящегося заряда, глубины взрыва, характера грунтов, а также от скорости и направления ветра и других метеорологических условий. При всех других более или менее равных условиях зараженность в районе воронки после подземного взрыва будет приблизительно такая же, как и при наземном взрыве. В обоих случаях величина тротилового эквивалента делящегося заряда предполагается одинаковой. Однако при подземном (неглубоком) взрыве общий размер зараженной площади будет больше вследствие того, что в этом случае количество радиоактивных продуктов деления, выпадающих на поверхность, будет более значительным.

IX.106. Выпадение радиоактивных веществ после неглубокого подводного взрыва типа испытательного взрыва «Бейкер», произведенного у Бикини, во многом напоминает выпадение при подземном взрыве. При взрыве, произведенном у Бикини, высота подъема радиоактивного облака была меньше, чем при воздушном взрыве такой же мощности. В результате выпадение радиоактивных веществ (фактически это был радиоактивный дождь) началось очень скоро после взрыва: первые капли дождя достигли поверхности лагуны в течение примерно первой минуты после взрыва. Таким образом, значительная часть продуктов деления и других радиоактивных веществ выпала за короткое время в ра-

диусе нескольких тысяч метров от места взрыва ядерной бомбы, тротиловый эквивалент которой составлял приблизительно 20 тыс. *т*.

IX.107. Во время испытания «Бейкер» у Бикини базисная волна, представлявшая собой зараженное облако или туман, состоящий из мельчайших капелек воды, образовалась через 10—12 секунд после взрыва и начала быстро распространяться во все стороны от места взрыва (см. § II.57), что явилось несомненной причиной увеличения радиоактивного заражения судов, находившихся в лагуне; однако базисная волна как источник заражения играет меньшую роль, чем выпадение радиоактивного дождя из зараженного облака.

IX.108. Существенное различие между подводным и подземным взрывами заключается в том, что в первом случае радиоактивные вещества после взрыва постепенно смешиваются с большими массами воды, в то время как в грунте такого смешивания не происходит. В результате диффузии различных радиоактивных продуктов взрыва, приводящей к смешиванию их с большими объемами воды, поступающими из незараженных районов, а также в результате естественного распада интенсивность радиоактивного излучения в воде довольно быстро падает. Некоторые данные о скорости снижения радиоактивной зараженности, а также о распространении радиоактивных веществ в воде приведены в табл. IX.108, составленной на основе результатов испытания «Бейкер» у Бикини. Так, в течение 2—3 дней радиоактивные продукты распространились на площади около 130 *км*², но к этому времени максимальная мощность дозы излучения была настолько мала, что пребывание в этом районе стало совершенно неопасным.

Таблица IX.108

Мощность дозы и площадь зараженной поверхности воды после подводного взрыва у атолла Бикини (тротиловый эквивалент 20 тыс. *т*)

Время после взрыва, *час*	Зараженная площадь, *км*²	Средний диаметр, *км*	Максимальная мощность дозы, *р/час*
4	42,7	7,35	3,1
38	47,5	7,66	0,42
62	126,0	12,6	0,21
86	160,0	14,2	0,042
100	182	15,2	0,025
130	276	18,8	0,008
200	412	22,8	0,0004

IX.109. Кроме упомянутых выше факторов, уменьшению радиоактивности воды после испытания «Бейкер» способствовало оседание продуктов деления на дно лагуны. Исследование материала,

взятого со дна через несколько дней после взрыва, показало, что значительная часть радиоактивных продуктов взрыва бомбы, очевидно, выпала из воды на дно. Полученные в результате этого исследования данные свидетельствуют о том, что выпадение большей части осадков на дно лагуны закончилось через неделю после подводного взрыва. К этому времени площадь дна, покрытая радиоактивными осадками, составляла около 155 *км*². Хотя общее количество радиоактивных веществ на дне лагуны было очень велико, оно вследствие распределения этих веществ на обширной площади не представляло опасности для морской флоры и фауны. Из наблюдений, произведенных спустя несколько месяцев, было установлено, что дальнейшее распространение зараженных веществ не имело места. Однако это отчасти можно отнести за счет замкнутого характера лагуны Бикини.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ОСТАТОЧНОЙ ЯДЕРНОЙ РАДИАЦИЕЙ[1]

Радиоактивный распад продуктов деления

IX.110. Смесь радиоактивных изотопов, из которых состоят продукты деления, является настолько сложной, что представить скорость распада этой смеси в зависимости от величины периода полураспада каждого изотопа в виде математического выражения практически невозможно. Однако экспериментально установлено, что за период времени от нескольких минут до 2—3 лет после взрыва общая скорость радиоактивного распада (или интенсивность излучения) продуктов деления с достаточной степенью точности может быть представлена относительно простым выражением:

$$\text{Скорость распада} = A_1 t^{-1,2}, \qquad (IX.110.1)$$

где t — время после образования продуктов деления, т. е. время после взрыва, а A_1 — постоянный коэффициент, выражающий собой скорость распада, зависящую от количества продуктов деления. Путем подстановки соответствующей величины A_1 это уравнение может быть также использовано для определения скорости испускания либо гамма-лучей, либо бета-частиц. Бета-частица освобождается при каждом радиоактивном распаде, в то время как фотоны гамма-лучей испускаются только примерно в 50% случаев распада продуктов деления, причем это соотношение меняется в зависимости от времени, прошедшего после взрыва.

IX.111. Величина дозы излучения (или мощности дозы), испускаемого продуктами деления, и в частности радиоактивными осадками, в основном обусловлена гамма-лучами ввиду их значительного радиуса действия и проникающей способности; бета-частицы

[1] Этот раздел при чтении данной главы может быть опущен.

при условии, что радиоактивные вещества не находятся непосредственно на коже или внутри организма, играют незначительную роль. Поэтому при определении изменения мощности дозы остаточного ядерного излучения в зависимости от времени бета-излучение в расчет можно не принимать. Если бы доля продуктов деления, распад которых сопровождается испусканием гамма-лучей, и энергия фотонов этих лучей не менялись со временем, то мощность дозы, т. е. количество рентгенов в час, находилась бы в прямой зависимости от интенсивности испускания гамма-лучей. Однако, как указывалось в § IX.34, в действительности дело обстоит не так. На ранних стадиях распада продуктов деления гамма-лучи обладают в среднем большей энергией, чем на более поздних стадиях. Однако для промежутков времени, представляющих практический интерес, т. е. для промежутков времени, начинающихся через несколько часов после взрыва, средняя энергия фотонов гамма-лучей может в основном рассматриваться как постоянная и равная приблизительно 0,7 *Мэв*.

IX.112. Хотя относительное количество гамма-излучателей меняется с течением времени согласно уравнению (IX.110.1), мощность дозы в любое время после взрыва можно установить с довольно хорошим приближением, исходя из следующего выражения:

$$\text{Мощность дозы гамма-излучения} = R_1 t^{-1,2}, \quad \text{(IX.112.1)}$$

где R_1 — постоянная величина. Физически величина R_1 эквивалентна значению эталонной мощности дозы.

Как правило, время t выражается в часах, и тогда R_1 представляет собой эталонную мощность дозы через один час после взрыва, выражаемую в *р/час*. Если R_t представляет собой мощность дозы, создаваемую определенным количеством продуктов деления, через t часов после взрыва, то из уравнения (IX.112.1) получаем

$$\frac{R_t}{R_1} = t^{-1,2}. \quad \text{(IX.112.2)}$$

При логарифмировании это выражение приобретает вид

$$\lg \frac{R_t}{R_1} = -1,2 \lg t. \quad \text{(IX.112.3)}$$

IX.113. Из уравнения (IX.112.3) следует, что график зависимости $\lg \frac{R_t}{R_1}$ от времени t будет представлять собой прямую линию с наклоном —1,2. При $t = 1$, т. е. через 1 час после взрыва, $R_t = R_1$, и, следовательно, это и есть основная отправная точка, через которую проведена наклонная линия с наклоном —1,2 на рис. IX.8.

IX.114. Если время t дано в часах, то мощности доз излучения R_t и R_1 выражаются в рентгенах в час. Тогда суммарная доза в рентгенах, полученная от данного количества продуктов деления

за любой указанный промежуток времени после взрыва, может быть легко определена путем прямого интегрирования уравнения (IX.112.2). Например, для интервала времени между t_a и t_b часов после взрыва

$$\text{Суммарная доза} = R_1 \int_{t_a}^{t_b} t^{-1,2}\,dt = \frac{R_1}{0,2}\left[\frac{1}{t_a^{0,2}} - \frac{1}{t_b^{0,2}}\right]. \quad (\text{IX.114.1})$$

Отсюда, зная эталонную мощность дозы R_1 в рентгенах через 1 час после взрыва, можно вычислить суммарную дозу (в рентгенах) для любого промежутка времени.

IX.115. Кривая, представленная на рис. IX.12, построена на основе уравнения (IX.114.1), где время t_a принято равным 0,0167 часа, т. е. 1 минуте; t_a представляет собой условно принятое время, по истечении которого начинается остаточная ядерная радиация. Таким образом, график, изображенный на рис. IX.12, показывает суммарную дозу остаточного излучения, полученную в течение любого указанного периода времени при непрерывном облучении за данный период времени.

IX.116. Уравнение (IX.114.1) можно применять также с целью определения продолжительности времени, в течение которого человек, находящийся на местности, зараженной продуктами деления, получает некоторую определенную дозу радиации. В данном случае суммарная доза является известной величиной; t_a представляет собой известное время после взрыва, по истечении которого человек оказывается на зараженной местности, а t_b — время, по истечении которого человек, подвергающийся облучению, должен покинуть эту местность. Чтобы решить эту задачу при помощи уравнения (IX.114.1), нужно знать величину эталонной мощности дозы R_1. Эта величина может быть получена из уравнения (IX.112.2), если мощность дозы R_t измерена в какой-либо момент после взрыва, например в момент входа в зараженную зону. Эти данные в графическом виде представлены на рис. XII.107 и XII.108.

IX.117. В принципе уравнением (IX.114.1) можно воспользоваться для определения полученной суммарной дозы радиации, образуемой радиоактивными выпадениями в зараженной зоне, при условии, что вся радиоактивность выпадает в течение очень короткого времени. В действительности радиоактивные частицы могут оседать в течение нескольких часов, и, не зная скорости, с которой эти частицы достигают поверхности земли, невозможно произвести правильный расчет. Однако после прекращения радиоактивных выпадений уравнения (IX.112.2) и (IX.114.1) могут быть использованы для различных расчетов доз излучения при условии, что имеется хотя бы одно измерение мощности дозы.

Радиоактивность продуктов деления в кюри

IX.118. Скорость распада радиоактивных веществ, а следовательно, и интенсивность излучения бета-частиц и гамма-лучей, сопровождающих этот распад, обычно выражается в единицах, именуемых **кюри**. Кюри представляет собой такое количество радиоактивного вещества, в котором происходит $3{,}7 \cdot 10^{10}$ распадов в 1 секунду. Такое количество распадов было выбрано потому, что оно приблизительно соответствует интенсивности распада 1 *г* радия. Поскольку активность продуктов деления, образующихся при ядерном взрыве, очень высока, то в этом случае удобнее пользоваться такой единицей, как мегакюри, равной 1 млн. кюри и соответствующей $3{,}7 \cdot 10^{16}$ радиоактивных распадов в 1 секунду.

IX.119. Как указывалось выше, при внешнем облучении организма гамма-лучи, испускаемые продуктами деления, оказывают в общем случае более значительное биологическое действие, чем бета-частицы. Поэтому активность продуктов деления, выраженная в (гамма) кюри, характеризует собой скорее интенсивность испускания гамма-фотонов, чем скорость радиоактивного распада. Используя уравнение (IX.110.1), можно рассчитать суммарную гамма-активность всех продуктов деления, образующихся при взрыве ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т* для различных моментов времени после взрыва. Данные расчетов приведены в табл. IX.119.

Таблица IX.119

Общая гамма-активность продуктов деления, образующихся при ядерном взрыве с тротиловым эквивалентом в 1 млн. *т*

Время после взрыва	Активность (мегакюри)
1 час	300 000
1 сутки	6 600
1 неделя	640
1 месяц	110
1 год	5,5

Мощность дозы излучения над зараженной поверхностью

IX.120. Если какой-нибудь участок поверхности равномерно заражен радиоактивными веществами, активность которых, выраженная в кюри, известна, то мощность дозы гамма-излучения на разных высотах над поверхностью можно определить при условии, что известна средняя энергия фотонов гамма-лучей. Результаты таких расчетов представлены на рис. IX.120 для плотности заражения, равной 0,388 (гамма) млн. кюри на 1 *км*²; при расче-

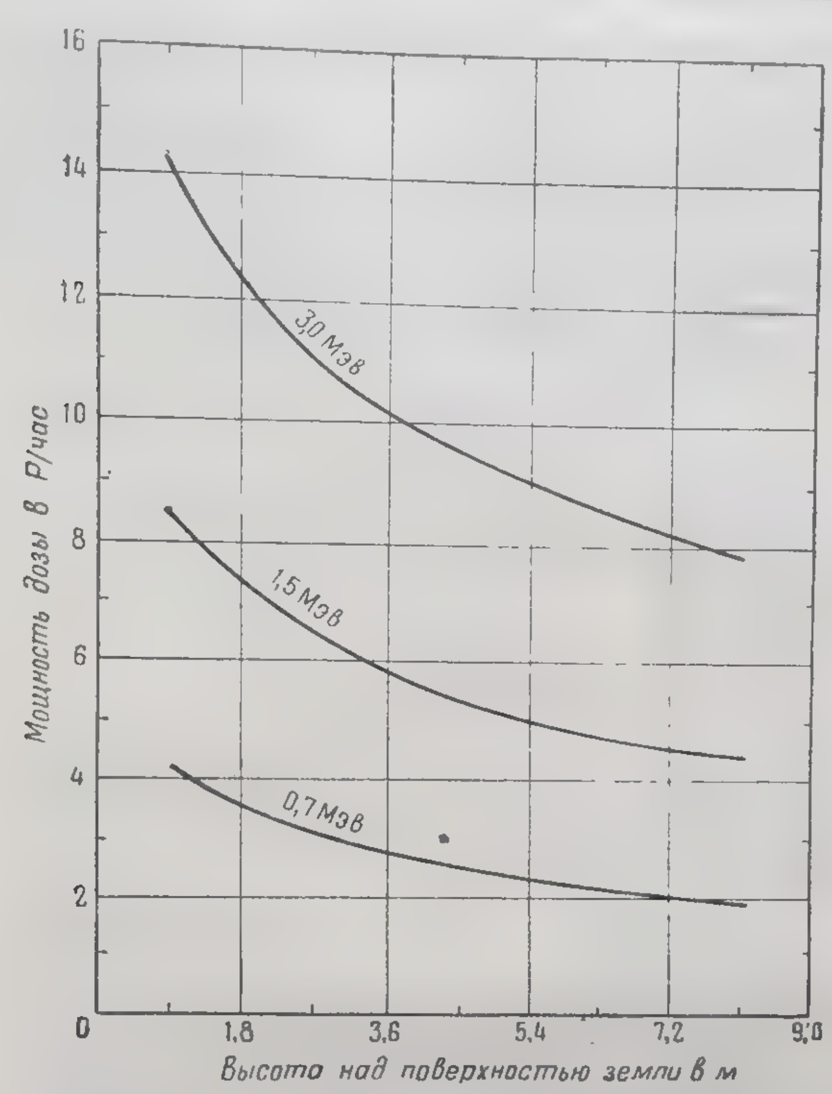


Рис. IX.120. Зависимость между мощностью дозы гамма-излучения и высотой над поверхностью земли при равномерном заражении местности с плотностью 0,388 млн. кюри на 1 *км*^{2} (для различных энергий излучения)

тах энергия фотонов гамма-лучей принята равной 0,7 *Мэв*, 1,5 *Мэв* и 3,0 *Мэв* соответственно. Кривая, построенная для фотонов с энергией 0,7 *Мэв*, применима к поверхности, зараженной продуктами деления. Если фактическая плотность заражения больше или меньше, чем 0,388 млн. кюри на 1 *км*^{2}, то ординаты, приведенные на графике, должны быть соответственно увеличены или уменьшены.

IX.121. Следует отметить, что при получении данных для построения графика, показанного на рис. IX.120, рассеянное гамма-излучение, образующееся в воздухе в результате взаимодействия гамма-фотонов с атомами кислорода и азота, во внимание не принималось. Ввиду этого фактические значения мощностей доз дол-

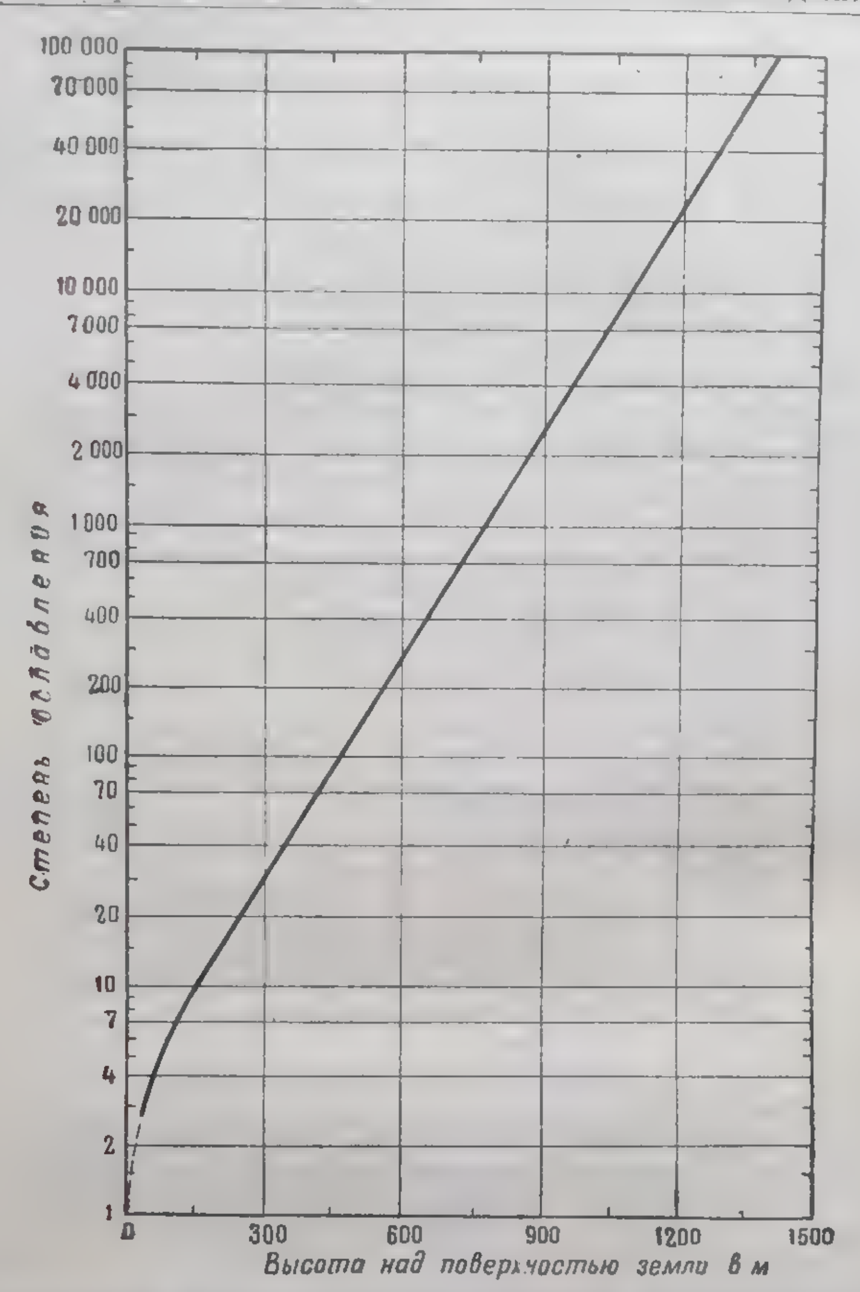


Рис. IX.122. Зависимость степени ослабления гамма-излучения, испускаемого с поверхности земли, от высоты

жны быть несколько выше приведенных на графике. С другой стороны, при проведении расчетов предполагалось, что зараженная поверхность является совершенно ровной. Для умеренно пересеченной местности мощность дозы на данной высоте будет меньше, чем для плоской поверхности. На практике эти два фактора, влияющие на величину мощности дозы, в основном компенсируют друг друга, и поэтому данные, приведенные на рис. IX.120, являются относительно точными при определении уровней радиации в воздухе над неровной поверхностью.

IX.122. Мощность дозы на значительных высотах над поверхностью земли, например на таких высотах, на которых обычно находятся самолеты в воздухе, может быть определена при помощи графика, изображенного на рис. IX.122. Этот график характеризует степень ослабления гамма-излучения, испускаемого продуктами деления, как функцию высоты. График в основном применим к равномерно зараженному району, площадь которого является большой

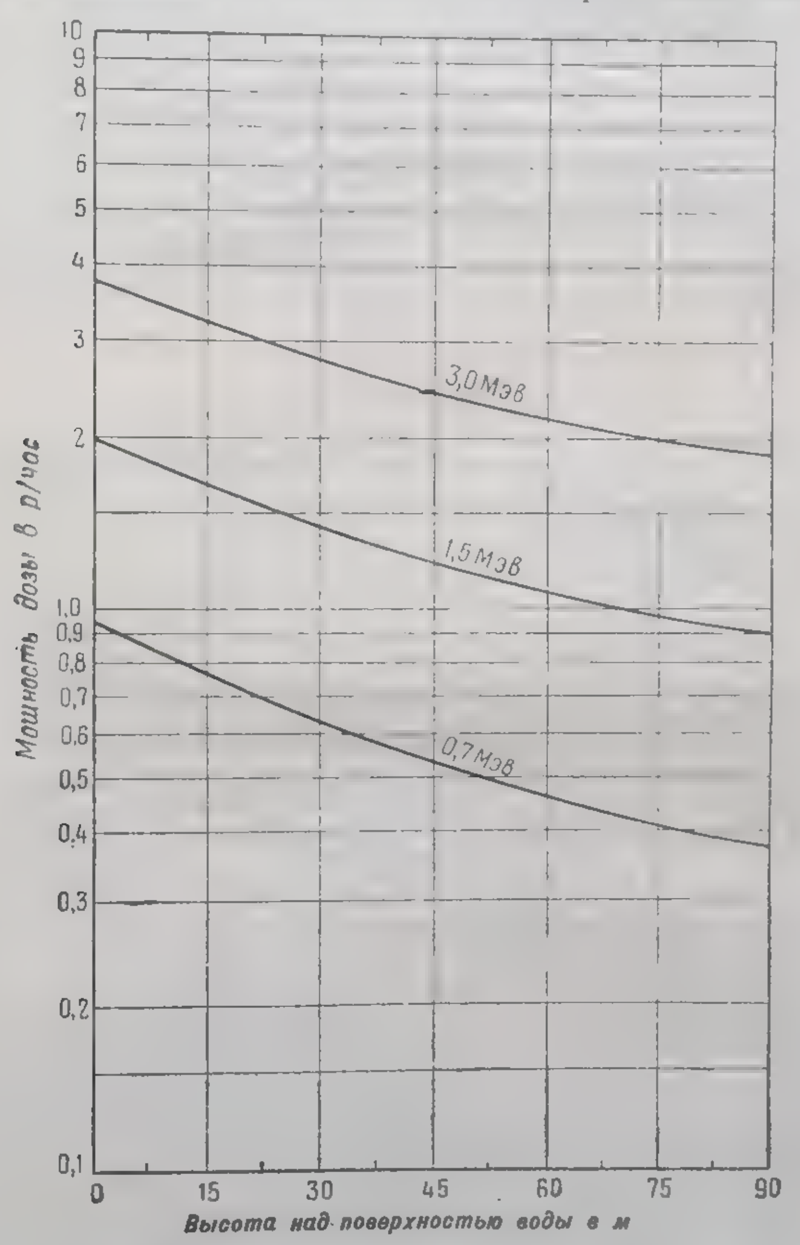


Рис. IX.124а. Мощность дозы гамма-излучения над поверхностью воды, объем которой равномерно заражен с плотностью 1,3 кюри на 1 $м^3$ при различных энергиях гамма-лучей

по сравнению с высотой самолета. Если мощность дозы у поверхности земли известна, то ее величина на любой заданной высоте может быть вычислена путем деления этой мощности дозы на степень ослабления, соответствующую данной высоте; с другой стороны, если мощность дозы измеряется на известной высоте, то величина мощности дозы у поверхности земли может быть получена

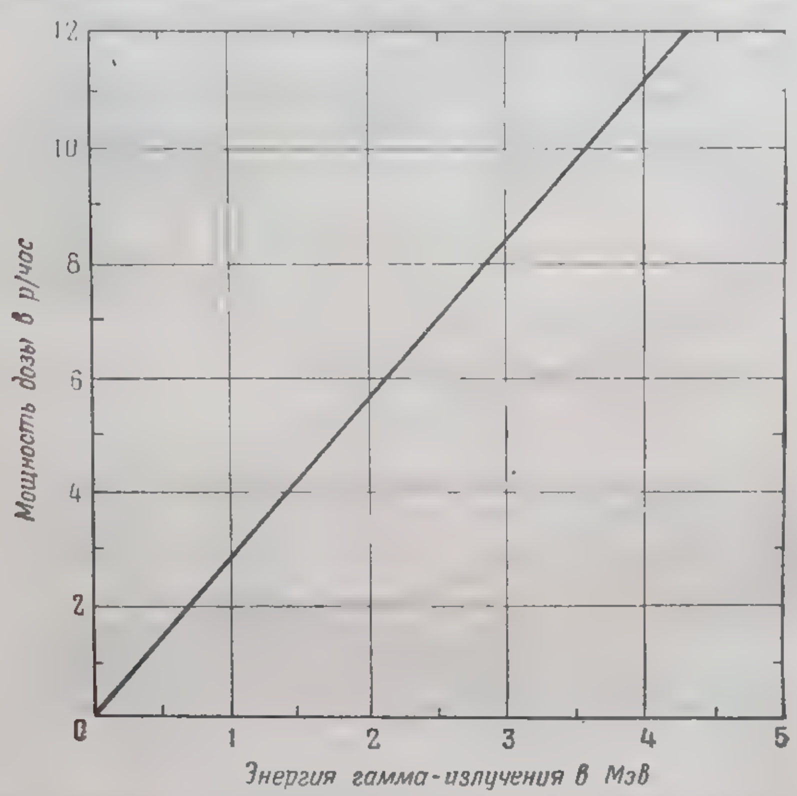


Рис. IX.124б. Изменение мощности дозы гамма-излучения внутри большого объема воды, которая равномерно заражена, с плотностью 1,3 кюри на 1 $м^3$, в зависимости от энергии гамма-излучения

путем умножения измеренной мощности дозы на величину степени ослабления.

IX.123. График, показанный на рис. IX.122, может быть использован для определения мощности дозы и плотности заражения на поверхности земли на основе измерений, производимых с самолета (см. § XII.77). Допустим, например, что дозиметрический прибор, установленный на самолете, показал на высоте 305 *м* мощность дозы излучения, равную 0,24 *р/час*. Величина степени ослабления для данной высоты составляет 30; следовательно, мощность дозы на поверхности земли будет составлять примерно $0{,}24 \times 30 = 7{,}2$ *р/час*. Из рис. IX.120 видно, что при плотности заражения в 0,388 мегакюри на 1 $км^2$ мощность дозы у поверхности земли составляет около 4 *р/час*. Следовательно, в данном случае плотность зараже-

ния будет равна приблизительно $\frac{0,388 \cdot 7,2}{4} = 0,7$ мегакюри на 1 *км*^{2}.

IX.124. На рис. IX.124а приведены значения мощностей доз для гамма-излучений различной энергии над поверхностью равномерно зараженной воды при плотности заражения 1,3 (гамма) кюри на 1 *м*^{3} (1,3 млн. кюри на 1 млн. *м*^{3}). Кривая, построенная для гамма-излучения с энергией фотонов 0,7 *Мэв*, может применяться для оценки заражения, обусловленного продуктами деления.

Для вычисления мощностей доз на разных высотах можно использовать данные графика, показанного на рис. IX.122. Мощности доз в самой воде, где заражение предполагается равномерно распределенным, приведены в виде функции от энергии фотонов гамма-лучей на графике, изображенном на рис. IX.124б. Измерения мощностей доз с самолета на определенной высоте позволяют рассчитать плотность заражения воды при использовании данных графиков, показанных на рис. IX.122 и IX.124а. После этого из графика IX.124б возможно определение мощности дозы в воде.

Скорость падения частиц

IX.125. Одной из важных сторон проблемы выпадения радиоактивных осадков является теоретическое исследование распределения частиц на поверхности земли в зависимости от размеров этих частиц и расстояния от места взрыва. Ниже приводится сравнительно простое решение этой проблемы, которое, хотя и является приближенным, все же дает, как можно полагать, качественно правильную картину.

Для иллюстрации предположим, что взрыв ядерного заряда большой мощности произведен вблизи поверхности земли. Хотя частицы, образующие радиоактивное облако, будут выпадать с различных возможных высот от 18 000 до 30 000 *м*, однако для упрощения расчета можно предположить, что все эти частицы начнут выпадать со средней высоты, равной 24 000 *м*.

IX.126. Скорость падения малых частиц в воздухе с больших высот под влиянием силы тяжести может быть приближенно определена по закону Стокса:

$$\text{Скорость падения} = 0,11\, d^2 \rho \text{ м/час}, \qquad \text{(IX.126.1)}$$

где ρ — плотность частицы в *г/см*^{3};

d — диаметр частицы в микронах.

Это выражение с довольно большой точностью применимо к частицам, диаметр которых составляет от 5 до 300 микронов, т. е. от $5 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ *см*. Скорость падения более крупных частиц несколько меньше скорости, получаемой на основе закона Стокса. На основе предположения, что плотность частиц радиоактивных выпадений соответствует плотности песка, то есть составляет

2,6 *г/см*³, по уравнению (IX.126.1) подсчитано приближенное значение времени, необходимого для того, чтобы частицы различных диаметров достигли поверхности земли с высоты 24 000 *м*. Данные расчетов приведены в табл. IX.126. Частицы диаметром менее 5 микронов в результате столкновений с молекулами воздуха подвержены сильному броуновскому движению, и поэтому часть их, как указывалось ранее, остается во взвешенном состоянии в течение очень длительного времени. На величину скорости падения даже крупных частиц оказывает влияние степень турбулентности воздуха.

Таблица IX.126

Приблизительная продолжительность времени падения частиц с высоты 24 000 *м*

Диаметр частиц, *мк*	Время падения, *час*
340	0,75
250	1,4
150	3,9
75	16
33	80
16	340
8	1400
5	3400

IX.127. Если бы все частицы начинали свое падение с одной и той же высоты, то данные, приведенные в табл. IX.126 или вычисленные по уравнению (IX.126.1), можно было бы использовать для оценки распределения частиц на поверхности земли в зависимости от расстояния от эпицентра взрыва. Действительное расстояние от эпицентра взрыва, на котором выпадают частицы, будет зависеть от высоты облака, поскольку последняя определяет время падения частиц, а также скорости среднего ветра. Тем не менее можно построить обобщенный график, представленный на рис. IX.127, определяющий зависимость между размерами радиоактивных частиц и расстоянием от эпицентра взрыва, на котором эти частицы достигают поверхности земли. Это расстояние равно произведению времени падения частиц, начинающих свое оседание с высоты 24 000 *м*, и скорости среднего ветра, равной 24 *км/час*. Очевидно, что частицы диаметром более 250 микрон выпадут относительно недалеко от эпицентра взрыва. Более мелкие частицы, однако, прежде чем они выпадут на землю в виде радиоактивного осадка, могут переместиться на весьма значительные расстояния.

IX.128. Идеальные условия, принятые при построении кривой, представленной на рис. IX.127, на практике не встречаются. Напри-

мер, закон Стокса, строго говоря, соблюдается только частично; далее, частицы, находящиеся в облаке, прежде чем начать свое падение, поднимаются не на одну и ту же высоту, как предполагалось при построении графика, а на разные высоты; кроме того, скорость ветра является величиной переменной; на скорость падения ча-

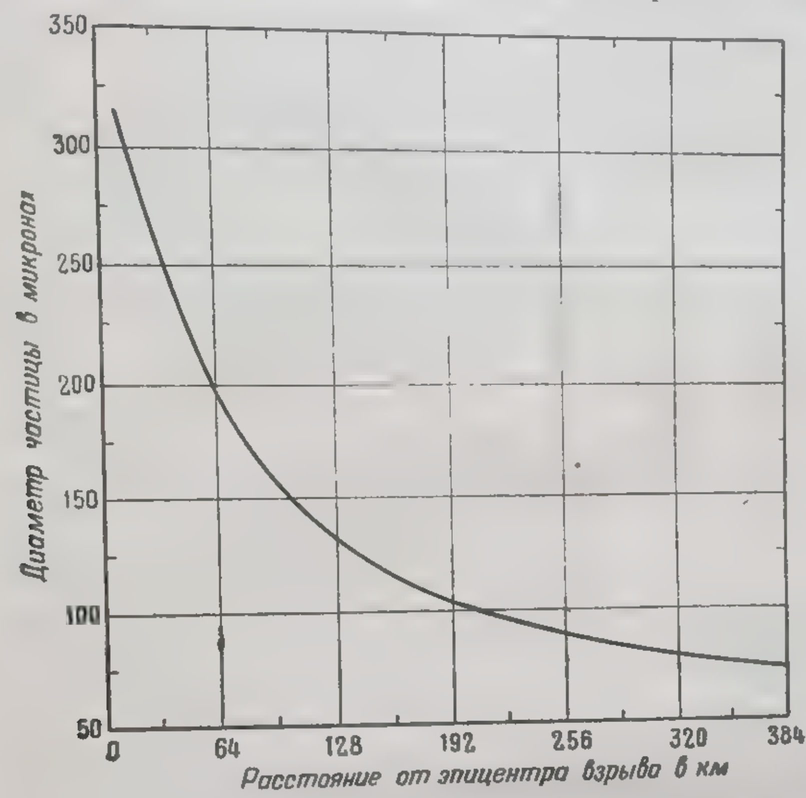


Рис. IX.127. Зависимость между размерами радиоактивных частиц и расстоянием от эпицентра взрыва, на котором выпадают эти частицы с высоты 24 *км* при средней скорости ветра 24 *км/час*

стиц, помимо этого, влияет форма и взаимное прилипание мелких частиц, а также турбулентные возмущения в воздухе. Следовательно, на распределение частиц на поверхности земли в зависимости от их размеров и расстояния от места взрыва оказывают влияние многие факторы. Однако можно полагать, что график, показанный на рис. IX.127, дает довольно правильное общее представление о характере распределения частиц различных размеров на поверхности земли в зависимости от расстояния от эпицентра взрыва.

IX.129. Пренебрегая приближениями, принятыми при построении графика, представленного на рис. IX.127, можно считать, что расстояния от места взрыва, на которых выпадают частицы различной величины, зависят в основном от скорости среднего ветра и средней высоты, с которой падают частицы. При взрыве ядерного

заряда с небольшим тротиловым эквивалентом высота подъема облака будет меньше; из этого вытекает, что время, в течение которого частицы достигнут в этом случае поверхности земли, а также соответствующие расстояния от эпицентра взрыва, на которых эти частицы выпадут на землю, будут меньшими, чем приведенные на рис. IX.127. С другой стороны, более высокая скорость среднего ветра приведет к увеличению расстояния, на котором зараженные частицы достигнут поверхности земли.

IX.130. С точки зрения радиоактивного заражения, помимо скорости падения, некоторую роль играет площадь поверхности частиц. Во многих частицах, собранных после испытательных взрывов, распределение радиоактивности по их объему было довольно равномерным, в других же частицах радиоактивность была сосредоточена только у поверхности (§ II.21). Однако ради упрощения последующего расчета будет принято, что имеет место заражение второго типа и что толщина поверхностного радиоактивного слоя всегда одинакова. В этом случае суммарная радиоактивность, содержащаяся в частицах данного размера, будет пропорциональна общей площади поверхности частиц, составляющих данную группу. Для расчета необходимо знать процентное распределение частиц, содержащихся в радиоактивных осадках, по размерам, т. е. долю, которая приходится на каждую группу частиц. Точных данных по этому вопросу нет. Для приближенных расчетов можно считать, что распределение частиц по размерам будет таким же, как и в поверхностном слое почвы района взрыва.

IX.131. Данные, приведенные в табл. IX.131, получены на основе указанных выше предположений. В первой графе табл. IX.126 приведены четыре группы частиц, выделенные в зависимости от их диаметра. Во второй графе этой же таблицы указано время, необходимое для выпадения частиц с высоты 24 000 *м*. Из таблицы IX.131 видно, что по истечении 16 часов после взрыва около 50% общего количества радиоактивных продуктов деления оседает на землю. При скорости среднего ветра 24 *км/час* частицы за это время переместятся по направлению ветра на 384 *км*.

Таблица IX.131

Относительное распределение радиоактивных продуктов взрыва, выпавших из радиоактивного облака с высоты 24 000 *м*

Диаметр частиц, *мк*	Время выпадения, *час*	Процентное содержание радиоактивности, приходящейся на данную группу частиц
340	До 0,75	3,8
340—250	0,75 до 1,4	12,6
250—150	1,4 до 3,9	14,5
150—75	3,9 до 16	18,1

IX.132. Данные, приведенные в последней графе таблицы IX.131, показывают долю начальной радиоактивности, выраженную в процентах, приходящуюся на различные группы частиц. Иначе говоря, здесь не внесено каких-либо поправок, которые бы учитывали естественный радиоактивный распад продуктов взрыва, протекающий как во время подъема этих продуктов с радиоактивным облаком, так и во время их выпадения из облака.

Однако вследствие радиоактивного распада активность выпадающих осадков будет тем меньше, чем позже эти осадки достигнут земли. Например, в табл. IX.131 указано, что за период между 3, 9 и 16 часами после взрыва поверхности земли достигает около 18% продуктов деления. Однако если сделать поправку на естественный радиоактивный распад, то доля оставшейся радиоактивности будет представлять собой менее 0,1% первоначальной активности, содержавшейся в облаке.

Прогнозирование траектории движения радиоактивных частиц при их выпадении

IX.133. В настоящее время для определения предполагаемой траектории движения радиоактивных частиц, образующихся при ядерном взрыве, предложено несколько методов, отличающихся друг от друга по степени сложности и точности получаемых результатов. Один из наиболее простых методов излагается ниже[1]. Хотя результаты, получаемые при использовании этого метода, менее точны, чем при использовании других способов, данный метод обладает тем достоинством, что он позволяет получать необходимые результаты быстро и что его можно применять при чрезвычайных условиях. Необходимо прежде всего иметь данные (или прогноз) о направлении и скорости среднего ветра для ряда слоев атмосферы толщиной в 1500 *м* каждый, начиная от поверхностного и кончая вершиной радиоактивного облака.

IX.134. Из точки *O*, представляющей эпицентр взрыва, проводится вектор *OA*, показывающий направление и скорость ветра (в *км/час*) в первом приземном слое (рис. IX.134). Вслед за этим проводят векторы *AB*, *BC*... *GH* для последующих слоев атмосферы вплоть до границы наблюдений, например вершины облака ядерного взрыва; в данном случае до высоты $8 \times 1500 = 12\,000$ *м*. Тогда линия *OH* характеризует собой траекторию частиц, выпадающих в различные промежутки времени с высоты 12 000 *м*. Более крупные частицы выпадут ближе к эпицентру вскоре после взрыва, в то время как более мелкие частицы выпадут дальше и в более позднее время. Линия *OG* характеризует собой траекторию частиц,

[1] Более точные методы основываются на вычислениях, производимых вручную или при помощи специальных машин.

выпадающих с высоты 10 500 *м*, поскольку на них не воздействует ветер, изображаемый вектором *GH*; аналогичным образом вектор *OF* характеризует собой траекторию частиц, начинающих выпадать с высоты 9000 *м*, и т. д. Усредненную скорость ветра для всех слоев атмосферы, вплоть до 12 000 *м*, можно получить путем деления результирующего вектора *OH* на число слоев толщиной 1500 *м*, в данном случае на 8.

IX.135. Область, охватываемая линией *OH* и различными векторами, дает грубое представление об общем направлении выпадения радиоактивных осадков по отношению к эпицентру взрыва.

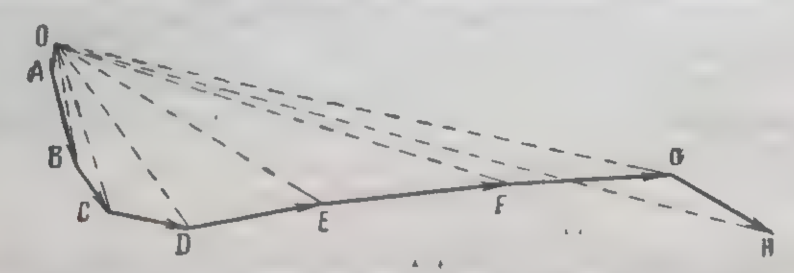


Рис. IX.134 Приближенная схема района выпадения радиоактивных частиц, построенная на основе данных о скоростях и направлениях ветра на различных высотах

Помимо воздействия ветра, в атмосфере происходит рассеивание частиц, имеющее своим результатом некоторое их отклонение во всех направлениях от идеализированной области, образованной векторами ветров.

IX.136. Рис. IX.134 дает только общее представление о форме района выпадения радиоактивных осадков, однако он не показывает общих размеров этого района. Если, как указывалось выше, векторы ветров, выраженные в *км/час*, проводятся для каждого слоя толщиной 1500 *м*, то *OH* представляет собой расстояние, проходимое за 8 часов частицами, опускающимися с высоты 12 000 *м*. Аналогичным образом *OG* представляет собой расстояние, проходимое частицами, опускающимися с высоты 10 500 *м* за 7 часов. Таким образом, по размерам фигуры *OAB... HO* приблизительно можно судить о площади, на которой будут оседать частицы диаметром в 75 микронов (и более). Такие частицы падают со скоростью 1500 *м* в час (и более). Частицы меньших размеров оседают медленнее и будут выпадать за пределами указанной площади. Направления выпадения на поверхности земли этих частиц, оседающих с различных высот, будут такими же, как и прежде; так, частицы с диаметрами менее 75 микронов, оседающие с высоты 12 000 *м*, будут выпадать вдоль линии, являющейся продолжением *OH*, а такие же частицы, оседающие с высоты 10 500 *м*, будут выпадать вдоль линии, являющейся продолжением *OG*. Отсюда следует, что общая конфигурация схемы выпадения более

мелких частиц похожа на конфигурацию, показанную на рис. IX.134, хотя она и будет занимать большую площадь.

IX.137. Очевидно, что описанный выше метод позволит получить только приближенные данные относительно вероятного района выпадения радиоактивных осадков. В действительности данные о распределении частиц по их размерам будут отсутствовать. Высота поднятия радиоактивного облака, из которого оседают частицы, будет также не вполне определенной. Кроме этого, при построении схемы, приведенной на рис. IX.134, не принимался во внимание тот факт, что направление и скорость ветра в каждом слое могут меняться с течением времени, а также не учитывалось влияние резких изменений характера ветра в тонких слоях воздуха. Наконец, не всегда будет соблюдаться основное допущение о том, что векторы ветров, принятые при построении схемы, пригодны для всего рассматриваемого района заражения, который может иногда простираться на расстояния до 320 *км* от эпицентра взрыва. Дождь или снег, выпадающие в момент взрыва (или вскоре после него), также изменят условия выпадения зараженных частиц, так как многие из этих частиц будут прилипать к каплям атмосферных осадков и оседать с различных высот со скоростями, характерными для выпадающего снега или дождя.

IX.138. В случае если к моменту взрыва данные о направлениях и скоростях ветров в верхних слоях атмосферы будут отсутствовать, можно использовать сведения об общем направлении ветров, характерных для данной местности в интересующее нас время года. Эти сведения, основанные на наблюдениях метеорологических станций в течение длительных периодов времени, возможно, могут быть дополнены визуальными наблюдениями за направлением движения облаков на различных высотах. Важно подчеркнуть, что схемы распределения радиоактивных веществ на поверхности земли, построенные с учетом направления ветров, наблюдаемых только в приземном слое воздуха, могут оказаться полностью ошибочными.

ГЛАВА X

ВЫПАДЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОСАДКОВ В ПРЕДЕЛАХ ВСЕГО ЗЕМНОГО ШАРА И ДЛИТЕЛЬНО ДЕЙСТВУЮЩАЯ ОСТАТОЧНАЯ РАДИАЦИЯ

МЕСТНОЕ РАДИОАКТИВНОЕ ВЫПАДЕНИЕ И ВЫПАДЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРЕДЕЛАХ ВСЕГО ЗЕМНОГО ШАРА

Введение

X.1. Рассмотренное в предыдущей главе выпадение радиоактивных осадков, образующихся при взрыве ядерной бомбы, имеет местный характер. Эти осадки состоят в основном из крупных зараженных частиц, оседающих на поверхность земли под влиянием действия силы тяжести в течение нескольких часов после взрыва. Расстояния от места взрыва, на которых выпадают эти частицы, относительно невелики и даже для самых мощных взрывов не превышают нескольких сотен километров от эпицентра взрыва в направлении ветра.

Опасность местных радиоактивных осадков в первый период после взрыва заключается главным образом в ядерных излучениях, испускаемых радиоактивными веществами, находящимися вне организма. В продолжение первых нескольких дней или недель после взрыва уровни радиации могут быть достаточно высокими и представлять опасность для лиц, подвергающихся их воздействию. Интенсивность излучений с течением времени быстро снижается, и, за исключением районов с очень сильным начальным заражением, эта интенсивность через несколько недель становится настолько незначительной, что не представляет собой серьезной опасности. Однако, как было показано ранее, радиоактивность с течением времени уменьшается все медленнее, ввиду чего она может сохраняться даже через несколько лет после взрыва.

X.2. Существует также и другая форма радиоактивного заражения, которая распространяется на гораздо большие площади, чем в случае местного заражения. Это радиоактивное заражение обусловлено той частью радиоактивных продуктов взрыва ядер-

ной бомбы, которая состоит из очень мелких частичек, остающихся взвешенными в воздухе в течение длительного периода, который может продолжаться от нескольких дней до нескольких лет. Эти мельчайшие частички могут переноситься ветром на значительные расстояния и в конечном счете могут осесть в весьма отдаленных от места взрыва районах земного шара. Выпадение этих частичек обозначается термином **выпадение в пределах всего земного шара**. При употреблении этого термина, однако, не следует полагать, что эти мельчайшие частицы совершенно не осаждаются в районах, находящихся поблизости от места взрыва; не следует считать также, что эти частицы равномерно распределяются по всей поверхности земного шара. Характер этого распределения будет рассмотрен ниже; здесь же важно отметить то, что рассматриваемый тип выпадений охватывает значительно более обширные районы, чем выпадения местного типа.

Х.3. Чрезмерное облучение, вызванное местным радиоактивным заражением, может привести к вредным последствиям, которые проявляются через несколько дней (или недель) после взрыва; эти последствия называются быстро проявляющимися. Кроме того, будут иметь место некоторые долго проявляющиеся (или остаточные) последствия, которые могут проявиться через многие годы после момента взрыва или вовсе не проявиться. Ядерное излучение, вызванное местным выпадением в первые часы после взрыва, так же, как излучение, получаемое при значительно меньших мощностях доз в течение многих месяцев или лет как от местного заражения, так и от выпадений в пределах всего мира, может увеличивать вероятность проявления этих остаточных эффектов. Такое излучение может обусловливаться радиоактивными веществами, находящимися как внутри, так и вне организма.

Х.4. Одним из остаточных последствий может быть генетическое изменение, вызванное облучением клеток, передающих наследственные качества от одного поколения другому. Эта сторона воздействия остаточного (и других типов) излучения будет более детально рассмотрена в главе XI. Рассматриваемые здесь остаточные эффекты представляют собой последствия, являющиеся результатом воздействия на ткани организма излучений, обусловленных радиоактивными веществами, которые накапливаются внутри организма в течение длительного периода времени. Именно в связи с рассмотрением этого вопроса и представляет интерес изучение проблемы радиоактивных выпадений в пределах всего земного шара.

Выпадение радиоактивных частиц из тропосферы

Х.5. Как уже было показано в предыдущих главах этой книги, местные радиоактивные выпадения имеют важное значение только

в том случае, когда ядерный взрыв происходит близко от поверхности земли (или под ней). При таких взрывах значительное количество радиоактивных частиц захватывается и уносится облаком ядерного взрыва. С другой стороны, выпадение радиоактивных частичек в пределах всего земного шара может быть обусловлено ядерными взрывами всех типов, за исключением только взрывов, произведенных глубоко под поверхностью земли, когда огненный шар в атмосферу не вырывается и вследствие этого радиоактивное облако взрыва не образуется. Однако, касаясь механизма выпадения зараженных частиц в пределах всего земного шара, необходимо проводить различие между характером этого выпадения при взрывах малой и большой мощности. Допустим, что взрыв происходит в нижней части тропосферы (тропосферой называется слой атмосферы, который простирается до высоты 10 000—16 000 *м* в зависимости от существующих климатических условий). При взрывах ядерных зарядов с тротиловыми эквивалентами порядка нескольких тыс. *т* радиоактивное облако обычно не поднимается выше границы тропосферы (см. § II.14, II.15). Вследствие этого почти все мелкие частицы, образующиеся при подобного рода взрывах, останутся в пределах тропосферы до тех пор, пока в конечном итоге не осядут на поверхности земли.

X.6. Механизм осаждения мелких частиц из тропосферы является весьма сложным. На выпадение, помимо обычного действия силы тяжести, оказывают влияние также и другие различные факторы. Наиболее важным из этих факторов является, по-видимому, захват радиоактивных частиц дождем или другими атмосферными осадками. Скорость выпадения радиоактивных веществ из тропосферы в любой момент времени, по-видимому, пропорциональна количеству этих веществ, имеющихся в тропосфере в данное время. Отсюда следует, что время, необходимое для оседания половины веществ, называемое периодом половинного оседания, является важной количественной характеристикой выпадений. При выпадении частиц из тропосферы период половинного оседания составляет несколько недель, так что частицы, образующиеся при ядерном взрыве, остаются в тропосфере в течение сравнительно непродолжительного времени.

X.7. За время, в течение которого мелкие частицы находятся в тропосфере во взвешенном состоянии, большая часть их перемещается ветром. Общее направление ветров таково, что эти частицы быстро переносятся в восточном направлении, делая полный оборот вокруг земного шара за период времени от четырех до семи недель. Рассеивание облака к северу и к югу происходит относительно медленно, в результате чего бóльшая часть мелких частиц, находящихся в тропосфере, выпадает на поверхность земли в течение небольшого периода времени, исчисляемого неделями, в относительно узкой полосе, опоясывающей земной шар по широте, от места ядерного взрыва.

Выпадение радиоактивных частиц из стратосферы

Х.8. При взрывах ядерных зарядов с тротиловым эквивалентом порядка нескольких млн. *т* почти все образующиеся при взрыве частицы пройдут через тропосферу и войдут в пределы стратосферы. Более крупные частицы, образующиеся при наземном или подземном взрыве, создадут при выпадении местное (локальное) заражение. Можно считать, что очень мелкие частицы, образующиеся в результате мощных взрывов всех типов, останутся в стратосфере и будут при осаждении распространяться по всему земному шару. Благодаря малым размерам этих частиц и отсутствию облаков и дождя на столь больших высотах эти частицы будут оседать на землю очень медленно. Подсчеты, основанные на ограниченных данных, имеющихся в настоящее время, указывают, что ежегодно на землю оседает примерно 10% находящихся в стратосфере частиц; соответствующий период половинного оседания составляет, таким образом, около 7 лет. Во время длительного нахождения в стратосфере частицы, образовавшиеся при взрыве бомбы, рассеиваются во все стороны медленно, но таким образом, что они могут опуститься в тропосферу над любой точкой земного шара. Попав в тропосферу, эти мелкие частицы, по-видимому, ведут себя так же, как и частицы, которые попадают в эту часть атмосферы в результате ядерного взрыва малой мощности; из тропосферы эти частицы относительно быстро увлекаются на землю дождем или снегом.

Х.9. Важной чертой этого стратосферного, охватывающего весь земной шар выпадения является то, что радиоактивные частицы в действительности накапливаются в стратосфере, и лишь небольшая их доля непрестанно выпадает вниз на поверхность земли. Находясь в стратосфере, эти частицы не представляют собой непосредственной опасности радиоактивного поражения. Действительно, за это время большая часть короткоживущих радиоактивных веществ подвергается распаду, а активность некоторой части долгоживущих радиоактивных веществ заметно уменьшается. Таким образом, радиоактивное выпадение из стратосферы представляет собой медленное непрерывное оседание радиоактивных веществ, охватывающее всю поверхность земного шара, причем скорость этого оседания зависит от общего количества имеющихся в стратосфере частиц, образующихся при ядерных взрывах большой мощности.

ОПАСНОСТЬ, СВЯЗАННАЯ С ДЛИТЕЛЬНО ДЕЙСТВУЮЩИМ ОСТАТОЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Введение

Х.10. Из всех продуктов деления, образующихся в результате испытаний ядерного оружия в мирное время или при его применении в военное время, наибольшую потенциальную опасность с точки

зрения поражения в течение длительного времени представляют, по-видимому, радиоактивные изотопы цезий-137 и стронций-90. Так как оба эти изотопа содержатся в продуктах деления в относительно большом количестве, а периоды их полураспада сравнительно продолжительны, они будут составлять значительный процент от общего количества радиоактивных веществ, содержащихся в выпадениях в пределах всего земного шара. Конечно, суммарная активность этих изотопов через длительный период времени после данного наземного или подземного взрыва будет значительно больше в местных выпадениях (вблизи точки взрыва), чем в выпадениях в пределах всего земного шара.

Цезий-137

X.11. Период полураспада радиоактивного цезия составляет 30 лет. Особый интерес этот элемент представляет в выпадениях с возрастом более одного года, так как цезий в этом случае составляет основную составную часть радиоактивных продуктов, распад которых сопровождается гамма-излучением [1].

Химические свойства цезия аналогичны свойствам калия. Соединения этих элементов в общем более растворимы в воде, чем соответствующие соединения стронция и кальция (см. § X.17); способы попадания этих двух пар элементов из почвы в организм человека являются совершенно различными.

X.12. В природе цезий встречается относительно редко и нормально в организме он содержится только в ничтожном количестве. Вследствие этого биохимия цезия изучена не так тщательно, как других элементов. Однако установлено, что цезий-137 распространяется внутри живых клеток теми же путями, как и калий, поэтому он содержится главным образом в мышцах. На основании одного опыта, проведенного на нескольких людях, было определено время, которое требуется для того, чтобы путем нормальных биологических процессов снизить содержание цезия в организме наполовину, т. е. был определен период половинного выведения его из организма (см. § XI.110). Этот период оказался равным 140 дням. Благодаря большой проникающей способности гамма-лучей, образующихся при радиоактивном распаде цезия-137, они распространяются более или менее равномерно на все части организма. Хотя радиоактивный распад цезия-137 сопровождается гамма-излучением, но ввиду того что этот элемент находится в организме относительно недолго и большая часть его оказывается не в жизненно важных частях организма, патологическая опасность

---

* [1] Гамма-лучи, обладающие высокой энергией, фактически испускаются барием-137, который является продуктом распада цезия и существует в течение очень короткого периода времени.

стратосферного выпадения остаточного цезия-137 будет меньше общей патологической опасности, обусловливаемой таким же количеством остаточного стронция-90.

Стронций-90

X.13. Стронций-90, по-видимому, представляет более серьезную опасность, чем цезий-137. Стронций-90 обладает относительно большим периодом радиоактивного полураспада, равным 28 годам. Кроме того, в процессе деления ядерного материала этот изотоп образуется в сравнительно больших количествах. Поэтому активность стронция-90 составляет значительную долю общей активности продуктов деления, имеющих возраст в несколько лет. Таким образом, даже если радиоактивные продукты взрыва находятся в стратосфере в течение нескольких лет, они будут содержать в себе значительный процент этого радиоактивного изотопа.

X.14. Стронций по своим химическим свойствам аналогичен кальцию, который играет важную роль в жизни как растений, так и животных. В организме взрослого человека кальция, который находится главным образом в костях, содержится около 1 *кг*. Вследствие химического сходства стронций, поступающий в организм, следует по такому же пути, как и кальций, и поэтому почти все количество стронция находится в костях, из которых он выделяется очень медленно. Период половинного выведения стронция из человеческих костей составляет примерно 10 лет.

X.15. Вероятность серьезных патологических изменений в организме данного индивидуума, вызываемых воздействием находящихся внутри радиоактивных веществ, зависит от интенсивности и энергии испускаемых ими излучений, а также от периода времени, в продолжение которого эти вещества остаются в организме (см. § XI.102 и далее). Хотя стронций-90 испускает только бета-частицы (а не гамма-лучи), достаточное количество этого изотопа может вызывать сильные поражения вследствие того, что, попав однажды в скелет, он будет находиться в нем в течение длительного периода времени. На основании результатов, полученных из опытов на животных, считают, что патологическим последствием действия достаточных количеств стронция-90 является анемия, некроз (омертвление) кости, раковая болезнь и, возможно, лейкопения (уменьшение белых кровяных телец в крови). Сочетание физических и химических свойств стронция-90, а именно: длительный период полураспада и его сходство с кальцием, так же как и характер патологических изменений, которые могут явиться результатом значительных концентраций этого радиоактивного вещества в костях скелета, делает, насколько это сейчас известно, стронций-90 наиболее опасным изотопом.

X.16. Генетические эффекты, которые могут быть вызваны

стронцием-90, относительно незначительны. Прежде всего бета-частицы, испускаемые находящимся в костях скелета стронцием-90, благодаря очень короткому пути пробега этих частиц в организме, не достигают воспроизводительных органов. Кроме этого, интенсивность вторичного излучения, вызываемого бета-частицами, низка. Наконец, количество стронция-90 в мягких тканях, откуда бета-частицы могли бы достигнуть воспроизводительных органов, невелико, и в этом отношении его воздействие можно не принимать в расчет.

Пути переноса стронция-90 из почвы в организм человека

X.17. Так как большая часть стронция-90 в конечном счете попадает на землю с дождем или снегом, он поступает в почву и в дальнейшем в человеческий организм через растения. На первый взгляд может показаться, что отношение содержания стронция к кальцию в человеческом организме должно быть таким же, как и отношение между этими элементами в почве, откуда человек получает пищу. К счастью, однако, отдельные процессы в цепи биологического переноса этих элементов из почвы в организм человека приводят к снижению относительного количества стронция-90, накапливающегося в организме человека. Процесс переноса состоит из следующих этапов: 1) из почвы в растение; 2) из растения в животное и 3) от животного к человеку. Некоторую долю кальция (и стронция) человек получает непосредственно из растений, т. е. с фруктами и овощами и другими продуктами питания растительного происхождения, но это количество, как будет показано ниже, незначительное. Опыты свидетельствуют о том, что в каждой из упомянутых выше трех стадий происходят процессы, действующие в пользу кальция и против стронция, так что отношение содержания стронция-90 к кальцию в человеческом организме ниже, чем в верхнем слое почвы толщиной в несколько сантиметров.

X.18. В силу наличия некоторых факторов очень трудно установить соотношение между относительным содержанием стронция-90 и кальция в растениях и в почве, на которой эти растения произрастают. Во-первых, растения получают в качестве питания большую часть минеральных веществ через свои корневые системы, которые у разных растений различны: некоторые растения имеют корни, проникающие глубоко, а корни других растений расположены близко к поверхности. Бо́льшая часть стронция-90 была найдена в необрабатываемой почве близко к поверхности, так что поглощение этого изотопа, как можно ожидать, должно изменяться в зависимости от характера произрастания данного растения. Во-вторых, хотя можно предполагать, что стронций и кальций вследствие их химического сходства будут конкурировать друг с другом в про-

цессе вхождения в корневую систему растений, однако не весь кальций почвы находится в состоянии, пригодном для ассимиляции. В почве имеются естественные соединения кальция, которые нерастворимы и которые непригодны для питания растений до тех пор, пока они не будут превращены в другие соединения такими агентами, как, например, гуминовая кислота. Большая же часть стронция-90, содержащаяся в радиоактивных выпадениях, охватывающих весь земной шар, встречается, однако, в растворимой в воде форме. В-третьих, хотя растения могут частично заменять кальций стронцием, они все же преимущественно потребляют кальций. В-четвертых, в дополнение к стронцию-90, который растения получают из почвы, они будут также получать некоторое количество стронция-90 из радиоактивных осадков, выпадающих непосредственно на поверхность растений. Экспериментальные данные, имеющиеся в настоящее время, показывают, однако, что отношение содержания стронция-90 к кальцию в растениях вообще несколько ниже, чем отношение между этими элементами в почве, в которой они произрастают.

Х.19. Потребление растений животными является промежуточным этапом процесса введения стронция-90 в организм человека. И опять же имеющиеся данные указывают, что благодаря влиянию естественных факторов отношение содержания стронция-90 к кальцию в продуктах животного происхождения ниже, чем отношение этих элементов в растительном корме, потребляемом животными. Только очень небольшое количество стронция-90 удерживается в мягких тканях животных организмов, так что количество этого изотопа в продуктах животного происхождения ничтожно. Большой интерес представляет и то обстоятельство, что отношение содержания стронция-90 к кальцию в коровьем молоке также значительно ниже, чем отношение этих элементов в корме коровы. Это обстоятельство снижает количество стронция-90, попадающего в организм человека. При непосредственном потреблении человеком продуктов растительного происхождения такое снижение, естественно, отсутствует. Однако, по-видимому, около трех четвертей кальция и, следовательно, значительная доля стронция-90, содержащихся в среднем рационе питания в США, поступают в организм человека с молоком и молочными продуктами. В разных районах положение может отличаться в зависимости от того, большую или меньшую долю составляют в рационе питания молоко и молочные продукты.

Х.20. Однако не все количество стронция-90, поступающее в организм с пищей, отлагается в костях человеческого скелета. Существенная доля этого изотопа точно так же, как кальций, выделяется из человеческого организма. Однако в костной системе здоровых индивидуумов всегда имеют место некоторые свежие отложения кальция, так что одновременно в состав этой системы включается и стронций-90. Естественно, что скорость отложения как

кальция, так и стронция-90 выше у детей, находящихся в процессе роста, чем у взрослых.

X.21. В дополнение к тому факту, что метаболизм в организме человека содействует выделению стронция, необходимо отметить, что количество удерживаемого стронция-90 в каждом последующем звене цепи потребления несколько меньше, чем в предыдущем. Таким образом, целый ряд защитных факторов снижает отложение стронция в человеческих костях. Проведенные в 1955 г. эксперименты с целью выяснения соотношений содержания стронция-90 и кальция в костях детей и в почве показали, что отношение содержания стронция-90 к содержанию кальция в костях детей составляло одну двенадцатую этого же отношения в почве. Последующими измерениями установлено, что доля стронция-90, проникающего в кости, может быть значительно ниже приведенной.

Степень активности стронция-90

X.22. До настоящего времени вопрос, связанный с наличием значительных количеств стронция-90 внутри человеческого организма, изучен недостаточно. Поэтому зависимость между вероятностью серьезного биологического эффекта и содержащимся в организме количеством этого изотопа, поскольку эта зависимость должна оцениваться косвенным путем, точно не установлена. Косвенная оценка этой зависимости основывалась на сравнении действия стронция-90 и радия на подопытных животных с данными воздействия радия на человека. На основе проведенного изучения было сделано предположение, что содержание в организме стронция-90 в количестве 10 микрокюри (одно микрокюри равно одной миллионной доле кюри — см. § IX.118) у значительной части населения вызвало бы заметное увеличение поражений костей раковой болезнью. Исходя из этого, Национальный комитет по защите от радиации и Международная комиссия по радиологической защите внесли предложение, согласно которому максимально допустимое (или безопасное) количество стронция-90 внутри организма для лиц, которые систематически подвергаются воздействию этого изотопа, должно равняться одному микрокюри. Поскольку среднее содержание кальция в скелете взрослого человека составляет около 1 *кг*, эта величина соответствует концентрации в скелете одного микрокюри стронция-90 на 1 *кг* кальция, т. е. она составляет одну десятую той концентрации, которая, как можно ожидать, вызовет заметное отклонение от нормы. В целом для всего населения пределом, который в общем считается приемлемым, является содержание стронция-90 в 0,1 микрокюри на 1 *кг* кальция. Этот предел согласуется с рекомендациями, внесенными в 1956 г. Национальной академией наук США.

X.23. В результате опытных ядерных взрывов, произведенных в различных странах за последние несколько лет, происходит непрерывное увеличение содержания стронция-90 в почве, растениях и костях животных. Это явление имеет повсеместный характер и не ограничивается районами, находящимися вблизи мест, на которых производятся опытные взрывы, хотя, естественно, в этих районах оно несколько выше благодаря наличию местного выпадения радиоактивных веществ[1]. По мере выпадения из стратосферы мелких радиоактивных частиц можно ожидать, что с течением времени будет происходить постепенное повышение количества стронция-90, хотя некоторая доля этого изотопа и будет подвергаться естественному радиоактивному распаду.

X.24. Количества стронция-90, которые до сего времени накопились в организме людей, значительно ниже пределов, которые считаются допустимыми для всего населения, и ниже тех, которые, как можно ожидать, способны вызвать поддающееся наблюдению увеличение частоты развития костных опухолей. Поскольку в течение последних лет скелет маленьких детей развивался в условиях выпадения радиоактивных осадков, содержание стронция-90 у этих детей дает наилучшее указание на максимальные количества этого изотопа, которые вообще могут иметь место в настоящее время. По состоянию на январь 1957 г. это содержание стронция-90 составляло несколько меньше одной тысячной (0,001) микрокюри на 1 *кг* кальция. Хотя некоторое увеличение содержания стронция будет иметь место и в будущем, безусловно, можно сказать, что если ядерные испытания будут в дальнейшем проводиться в таком же темпе, как они проводились в прошлом, то длительно действующие биологические эффекты стронция-90 не будут поддаваться обнаружению. В том случае, если в ходе военных действий будет широко применяться ядерное оружие с высоким выходом продуктов деления, расчеты, основанные на приближенных, а поэтому недостаточно точных предпосылках, показывают, что прежде чем распространяющиеся в масштабе всего земного шара радио-

---

[1] Как было установлено в § X.10, при наземном или низком воздушном взрыве значительная доля образовавшегося стронция-90 будет находиться в местных радиоактивных выпадениях. Отсюда следует ожидать, что районы, находящиеся поблизости от места взрыва, будут заражены этим изотопом значительно больше, чем отдаленные районы; степень этого заражения зависит от высоты (или глубины) и общего тротилового эквивалента ядерного взрыва, а также тротилового эквивалента, обусловленного делением ядер вещества заряда, и от атмосферных условий. Имеются данные о том, что в местных выпадениях вблизи центра взрыва стронций-90 составляет меньший процент всех продуктов деления, чем на больших расстояниях. Это может быть объяснено тем обстоятельством, что стронций-90 не является непосредственным продуктом деления и что по этой причине он не образуется в момент взрыва. Он образуется постепенно, в течение нескольких минут в результате радиоактивного распада газа криптона-90, получающегося в процессе деления ядер вещества заряда (см. § XI.121).

активные выпадения повысят концентрацию стронция-90 до одного микрокюри на 1 *кг* кальция, имеющегося в организме людей, в стратосферу должны быть выброшены радиоактивные частицы от взрывов бомб с общим тротиловым эквивалентом, составляющим много тысяч млн. *т* [1].

---

[1] Здесь необоснованно преуменьшается биологическая опасность стронция-90, выпадающего при взрывах ядерного оружия. Многочисленными исследованиями ученых разных стран, в том числе и Советского Союза, доказано, что радиоактивные выпадения, и прежде всего стронций-90, оказывают вредное воздействие на здоровье людей в любых фазах. Кроме того, они вызывают генетические последствия, которые могут оказаться вредными для будущих поколений. Советские ученые и виднейшие прогрессивные ученые всего мира решительно выступают за запрещение всех испытаний ядерного оружия и изъятие его из национальных вооружений. Советское Правительство, осуществляющее последовательную политику мира и заботы о благе человечества, ведет неустанную борьбу за избавление человечества от угрозы истребительной ядерной войны и опасностей, связанных с испытанием ядерного оружия.— *Прим. ред.*

ГЛАВА XI

ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА НА ЛЮДЕЙ

ВВЕДЕНИЕ

Потери при ядерных взрывах

XI.1. Ядерный взрыв в результате действия ударной волны и пожаров сопровождается повреждениями и разрушениями сооружений на значительной площади. Соответственно следует ожидать также многочисленных потерь и среди людей. Таблица XI.1 содержит наиболее достоверные из имеющихся сведений о количестве потерь среди гражданского населения в результате воздействия всех поражающих факторов воздушных взрывов атомных бомб с тротиловым эквивалентом около 20 тыс. *т* над Хиросимой и Нагасаки в Японии. Обобщенные показатели потерь подсчитаны с учетом плотности населения один человек на 93 $м^2$. В качестве сравнения можно указать, что этот показатель для тротиловой бомбы весом 1 *т*, взорванной в городе, равен примерно 40.

Таблица XI.1

Потери в Хиросима и Нагасаки в результате ядерных взрывов мощностью 20 тыс. *т*

	Хиросима	Нагасаки
Общая численность населения	255 000	195 000
Зона разрушений, $км^2$	12	4,8
Убитых и пропавших без вести	70 000	36 000
Получивших несмертельные поражения	70 000	40 000
Обобщенный показатель потерь	260 000	130 000

XI.2. Поражения людей в результате атомного взрыва разделяются на три основных вида: травмы под действием ударной волны, ожоги и поражения ядерной радиацией. Действие ударной волны при взрыве ядерной бомбы в целом аналогично действию при взрыве обычных бомб. Однако при ядерном взрыве в короткий промежуток времени возникают более многочисленные и

разнообразные травмы. Основной причиной ожогов при воздушном взрыве атомной бомбы является световое излучение, хотя отдельные лица, оказавшиеся в очаге пожара, могут получить ожоги и от пламени. В последнем случае обстоятельства не отличаются от тех, которые создаются при массированной бомбардировке зажигательными бомбами. Поражения ядерной радиацией, естественно, представляют собой совершенно новую причину потерь на войне.

XI.3. Единственной информацией о потерях, которые можно ожидать вследствие применения ядерного оружия, являются данные, полученные в связи с воздушными взрывами атомных бомб над территорией Японии. Поэтому главным образом эти данные будут использоваться в качестве основы для последующих рассуждений. Однако как общее число потерь, так и количественное соотношение различных видов поражений будут в значительной степени зависеть от конкретных обстоятельств даже при взрывах одинаковой мощности. Кроме мощности взрыва, в этой связи можно указать на такие факторы, как высота и тип взрыва, характер местности, характер преобладающих строений в городе, меры по защите населения (использование убежищ, эвакуация и т. д.), а также состояние погоды.

XI.4. Как было указано в § VII.69, большое количество ожогов от светового излучения в Японии объяснялось также тем, что во время атомного нападения стояла теплая и ясная летняя погода. При низкой облачности, тумане, в случае холодной погоды, при которой меньшее количество людей было бы на улице, причем на них была бы менее легкая одежда, количество ожогов от светового излучения, безусловно, сократилось бы. Вследствие относительно большой высоты взрыва в Японии поражений остаточной радиацией не было, однако многие пострадали от первичной радиации. Таким образом, приводимые ниже данные относятся к конкретным условиям, существовавшим в Японии, и не должны рассматриваться как типичные для всех случаев. Следует отметить, что в Японии наблюдался резкий недостаток сил и средств для ликвидации огромной катастрофы, вызванной атомным нападением, и это способствовало увеличению числа погибших.

Причины смертных случаев

XI.5. В нашем распоряжении нет точных сведений о соотношении количеств погибших от отдельных видов поражений (ударной волной, радиацией и световым излучением), вызванных атомными взрывами в Японии. Было подсчитано, что примерно 50% всех смертных случаев явились результатом различных ожогов, однако эта цифра представляет собой только грубое приближение. Сообщалось также, что около двух третей умерших в Хиросима в течение первых суток после взрыва имели тяжелые ожоги. В дополне-

ние известно о преобладании в первую неделю после взрыва смертности от ожогов, вызванных световым излучением.

XI.6. Одна из трудностей установления количественного соотношения различных видов поражения заключается в том, что многие, пораженные воздушной волной, одновременно были обожжены; это же явилось участью и других, кто в конечном счете умер в результате действия ядерного излучения. Вполне вероятно, что в радиусе около 800 *м* от эпицентра взрывов атомных бомб в Японии ударная волна, ожоги и радиация, действуя отдельно, могли бы во многих случаях вызвать смертельные поражения.

XI.7. Однако необходимо подчеркнуть, что благодаря различным обстоятельствам не все, находившиеся на расстоянии 800 *м* от эпицентра, погибли во время взрыва. Из тех, кто пережил взрывы в Хиросима и Нагасаки, многие умерли через две или более недель с симптомами, которые были результатом, как предполагали, воздействия ядерной радиации (см. § XI.43 и последующие). Как полагают, эта категория поражений составила от 5 до 15% общего числа потерь. На основании грубых подсчетов можно сказать, что примерно 30% умерших в Хиросима подверглись воздействию смертельных доз ядерной радиации, хотя это и не во всех случаях было непосредственной причиной их смерти.

Соотношения различных видов поражений среди оставшихся в живых

XI.8. На основании обследований большого количества японцев было составлено относительно полное представление о соотношении трех видов поражений среди подвергшихся ядерному нападению (см. табл. XI.8).

Необходимо отметить, что итог от сложения долей, соответствующих каждому виду поражений, превышает 100%. Это означает, что многие лица подверглись воздействию не одного, а нескольких поражающих факторов ядерного взрыва.

Таблица XI.8

Соотношение различных видов поражений среди лиц, оставшихся в живых

Вид поражения	% от общего количества оставшихся в живых
Механические травмы	70
Ожоги	65—85
Поражения ядерным излучением	30

XI.9. Наибольшая смертность от атомного взрыва в Японии наблюдалась среди тех, кто во время взрыва оказался на улице.

Смертность была меньше среди лиц, находившихся в жилых домах (глинобитных с деревянным каркасом), и минимальной среди находившихся в бетонных зданиях. Однако наибольшее число ранений различными летящими предметами получили лица, находившиеся в бетонных зданиях, в то время как среди лиц, находившихся на открытом воздухе, таких ранений отмечено наименьшее количество. Положение было обратным по отношению к действию светового излучения и ядерной радиации, поскольку строения, особенно капитального типа, обеспечивают определенную защиту от этих поражающих факторов.

Тип взрыва

XI.10. Хотя воздушный взрыв является единственным типом ядерного взрыва, относительно которого имеется какая-либо информация о количестве потерь, тем не менее можно сделать некоторые предположения и относительно других типов взрывов. При подземном взрыве число поражений световым излучением (световые ожоги) и первичной ядерной радиацией будет значительно меньше, так как только небольшая доля этих излучений распространится в воздухе. Благодаря более низкому давлению воздуха количество поражений ударной волной будет, по-видимому, также меньше, чем при воздушном взрыве одинаковой мощности. Однако в районе воронки, образованной неглубоким подземным взрывом, выживших будет очень мало вследствие преобладания тяжелых механических травм. Кроме того, для наземных и подземных взрывов характерны другого рода поражения, а именно: поражения остаточной ядерной радиацией, образуемой оседающими продуктами ядерного распада. Однако смертельных случаев от этого поражения не будет наблюдаться в течение первых дней и даже недель после взрыва.

XI.11. Потери при наземном взрыве ядерной бомбы будут возникать от механических повреждений в результате действия ударной волны и образования воронки, от световых ожогов и от поражений первичной и остаточной ядерной радиацией. Световых ожогов и поражений первичной ядерной радиацией будет несколько меньше, чем при воздушном взрыве одинаковой мощности, однако действие остаточной ядерной радиации может быть весьма серьезным благодаря обильному выпадению радиоактивных частиц.

ВИДЫ ПОРАЖЕНИЙ

Поражения от непосредственного воздействия ударной волны

XI.12. Необходимо различать два типа поражений ударной волной — непосредственные и косвенные. Непосредственные поражения являются результатом действия на организм положительной

фазы ударной волны (см. § III.5) и проявляются в виде различных повреждений легких, желудка, кишечника, органов слуха, а также в виде внутренних кровоизлияний. Подобные поражения наблюдаются также после крупных воздушных нападений с применением обычных фугасных бомб. Этот вид поражений не имел в Японии первостепенного значения среди главных причин смертельных исходов, так как люди, находившиеся достаточно близко от эпицентра взрыва, погибли от ожогов или были раздавлены независимо от действия ударной волны. Среди тех, кто остался в живых, случаев повреждения внутренних органов непосредственным действием ударной волны не было; исключение составляют лица с разрывами барабанных перепонок. Эти поражения не являлись многочисленными и возникали лишь у находившихся в радиусе около 900 *м* от эпицентра взрыва [1].

XI.13. Многие лица, не имевшие серьезных поражений, временно теряли сознание. Как полагали, это было результатом непосредственного воздействия ударной волны, но не исключена возможность, что отдельные лица были отброшены ударной волной на большое расстояние.

XI.14. При изучении поражающего действия взрыва фугасных бомб было установлено, что смертельные поражения человека от непосредственного действия ударной волны наблюдаются при избыточном давлении порядка 14—21 *кг/см*^{2}, а при давлении порядка 5,6 *кг/см*^{2} возникают повреждения различной тяжести. Однако эти данные нельзя полностью переносить на условия ядерного взрыва, для которого, кроме высокого избыточного давления, характерны также большая скорость его нарастания и длительность положительной фазы.

XI.15. При быстром нарастании давления во фронте ударной волны или при значительной длительности положительной фазы, а также когда ударная волна имеет одновременно эти характеристики, тяжелые (или смертельные) поражения возникают при значительно более низких показателях избыточного давления. Так, опыты свидетельствуют о том, что семикратное повышение длительности действия ударной волны влечет за собой трехкратное снижение величины избыточного давления, вызывающего смерть у собак. Поскольку положительная фаза ударной волны при ядерном взрыве более продолжительна, чем при взрыве обычной бомбы, можно ожидать, что смертельные поражения и травмы будут вызываться избыточным давлением, величина которого будет соответственно менее 14 и 5,6 *кг/см*^{2}.

---

[1] Величина избыточного давления, вызывающая разрыв барабанной перепонки, по-видимому, в значительной степени зависит от ряда обстоятельств. Многие наблюдения показывают, что для этого требуется минимальное избыточное давление порядка 0,7—1 *кг/см*^{2}. Однако были зарегистрированы случаи разрыва барабанных перепонок при более низких и более высоких избыточных давлениях.

XI.16. Характер действия ударной волны на организм человека в известной степени сходен с характером ее действия на инженерные сооружения (см. гл. III). Ввиду небольших размеров тела человека процесс обтекания проходит очень быстро; ударная волна почти мгновенно охватывает тело человека и подвергает его сильному сжатию, что продолжается со снижающейся интенсивностью в течение всего периода положительной фазы. В то же самое время вызванный взрывом скоростной напор создает лобовое давление весьма значительной величины.

XI.17. Под действием сжатия и последующего разрежения повреждения чаще всего возникают в местах прилегания тканей к содержащим воздух органам, а также в местах прикрепления сухожилий к костям и хрящам. Обычными последствиями прямого действия ударной волны являются: повреждение центральной нервной системы, сердечная недостаточность в результате непосредственного нарушения работы этого органа и удушение, вызванное кровоизлиянием в легкие или выдавливанием жидкости в легочную ткань. Могут также наблюдаться кровоизлияния по ходу желудочно-кишечного тракта.

XI.18. Лобовое давление может вызвать смещение всего организма в пространстве. Последствия от такого смещения будут зависеть от многих обстоятельств, наиболее важными из которых являются скорость движения тела, его ускорение и замедление, характер предметов, о которые оно ударяется, а также область тела, на которую приходится удар. Сила, определяющая скорость движения тела, в значительной мере зависит от размеров его лобовой поверхности, подверженной воздействию скоростного напора, образовавшегося в результате взрыва. Так, например, человек, распростертый на земле, будет значительно меньше затронут этой силой, чем человек, стоящий или идущий.

Поражения, косвенно связанные с действием ударной волны

XI.19. При ядерном нападении на Японию поражения от косвенного или вторичного воздействия ударной волны имели бо́льшее значение, чем поражения от непосредственного ее воздействия; в частности, косвенные поражения возникали в результате обрушивания зданий и ударов многочисленными летящими обломками различного характера. Если количество пострадавших от ушибов о какие-либо твердые предметы было незначительным, то очень многие получили травмы от летящих обломков или были раздавлены и похоронены под зданиями. Осколки стекла (в особенности), деревянные щепки и куски металла проникали под кожу на глубину до 2,5 *см*, в некоторых случаях даже через несколько слоев одежды. При небольшой величине таких осколков одежда обеспечивала некоторую защиту.

XI.20. Во время проведения опытных взрывов в штате Невада в 1955 г. были изучены условия образования летящих предметов внутри зданий и на открытой местности за зданиями, что отмечалось в главе IV. Некоторые из полученных результатов и, в частности, данные о максимальной плотности на единицу площади и скорости летящих предметов приведены в табл. XI.20. Относительно острый летящий предмет, например кусок стекла, обладая определенной скоростью, может пробить брюшную стенку подопытных животных. Бо́льшая часть осколков, собранных внутри дома, состояла из кусков стекла, в то время как предметы, собранные на открытом месте, представляли собой стекло, куски каменной кладки, камни и обломки дерева. В местах, защищенных домами или крупным машинным оборудованием, количество летящих предметов значительно уменьшалось.

Таблица XI.20

Плотность и скорость летящих предметов

Максимальное избыточное давление, *кг/см²*	Максимальная плотность летящих предметов (количество на 1 *м²*)	Скорость летящих предметов, *м/сек*
0,35	693—2173	18—106
0,27	178—693	18—85
0,13	1—42	15—49

XI.21. Поражения среди японцев в результате косвенного воздействия ударной волны (механические повреждения) по тяжести варьировали от мелких царапин, ушибов и контузий до полного раздавливания, тяжелых переломов и рваных ран с кровоизлияниями. Рваные раны, требовавшие лечения, появлялись у людей в Хиросима на расстоянии до 3200 *м*, а в Нагасаки — до 3600 *м* от эпицентра взрыва. Эти расстояния грубо определяют также зону значительного повреждения окон.

XI.22. При обследовании тех людей, которые остались в живых после атомного нападения в Японии, был установлен любопытный факт: количество людей, получивших тяжелые механические травмы, было весьма незначительным. Так, например, из 675 обследованных не было ни одного случая перелома черепа или позвоночника и отмечен только один случай перелома бедра. Вместе с тем следовало бы ожидать большого количества травм такого характера. Упомянутый факт, по-видимому, объясняется тем, что все, получившие тяжелые контузии, переломы или оказавшиеся беспомощными в результате повреждения нижних конечностей, а также придавленные в развалинах зданий, погибли во время пожаров.

XI.23. Было установлено, что характер и тяжесть механических травм, а также их распределение по упомянутым ранее группам, в значительной степени зависели от того, где находились пostra-

давшие во время взрыва — на улице или в здании. В целом механические поражения оказывались менее серьезными и встречались реже среди находившихся на улице, где, однако, многие получили смертельные поражения другого характера. В зданиях механические поражения были более серьезными, причем количество и тяжесть поражений зависели от конструкции здания и особенно от количества использованного в нем стекла.

XI.24. Некоторые данные о характере механических травм были получены при обследовании пострадавших, находившихся в военном госпитале в Хиросима. Результаты обследований приведены в табл. XI.24. При анализе данных этой таблицы (это вытекает также и из других данных) можно отметить малое количество переломов. Этот вид травм составлял среди тех пострадавших, которые выжили, по-видимому, лишь около 5% общего количества пораженных в результате косвенного воздействия взрывной волны

Таблица XI.24

Соотношение различных видов механических травм (в Хиросима)

Характер травмы	%
Переломы	11
Рваные раны	35
Контузии	54

XI.25. Заживление ран во многих случаях проходило медленно и сопровождалось их инфицированием. Это объяснялось несколькими причинами. Во-первых, механические травмы часто возникали при одновременном воздействии радиации, которая понижает сопротивляемость организма к инфекции (см. § XI.6—7). Во-вторых, было недостаточно сил и средств для лечения пострадавших ввиду их многочисленности и общей дезорганизации, имевшей место после ядерных взрывов.

Ожоги пламенем и световым излучением

XI.26. Как указано в главе VII, в Хиросима и Нагасаки наблюдались два основных вида ожогов: 1) ожоги пламенем и 2) ожоги от воздействия светового излучения. Световые ожоги от ожогов пламенем обычно можно было отличить по их «профильному» характеру, что объясняется экранированием отдельных участков тела, например, одеждой (§ VII.71). Ожоги пламенем, наоборот, поражали значительную часть тела, поскольку одежда обычно загоралась. Однако если воздействию светового излучения подвергались большие участки кожных покровов, то соответственно и световые ожоги распространялись на большие участки кожи.

XI.27. Среди тех людей, которые были обожжены пламенем, выживших было немного. Они составляли не более 5% от общего количества обожженных. Это объясняется тем, что большинство из пострадавших от ожогов пламенем погибло в горящих зданиях. Ожоги пламенем в результате ядерной бомбардировки были аналогичны по своему характеру ожогам, возникающим при других случаях пожара, и этот вопрос не требует дальнейшего рассмотрения.

XI.28. Как уже указывалось выше, световые ожоги являлись весьма распространенным видом поражения как в Хиросима, так и в Нагасаки. В Хиросима, например, сообщалось о 40 000 относительно серьезных случаях ожогов. Световые ожоги независимо от действия других факторов, по-видимому, были бы смертельны почти для всех людей, находившихся на открытой местности без существенной защиты на расстояниях до 1800 *м* и даже более от эпицентра взрыва. Даже на расстояниях 3600—4200 *м* от эпицентра наблюдались достаточно серьезные случаи световых ожогов, которые требовали лечения.

XI.29. Световые ожоги в наибольшем количестве отмечались, конечно, среди людей, находившихся на улице. Тем не менее многие получали это поражение, находясь внутри зданий. Упомянутый факт объясняется тем, что окна, особенно в торговых зданиях, не были зашторены или были открыты настежь ввиду теплой погоды, вследствие чего люди, находившиеся внутри зданий, оказались подверженными непосредственному воздействию светового излучения. Помимо защиты от светового излучения, обеспечиваемой одеждой, в особенности светлого цвета, как это указывалось в главе VII (см. рис. VII.72 и VII.78), экранирование в некоторой степени обеспечивалось выступающими частями тела, например носом, надбровными буграми и подбородком.

XI.30. Несмотря на тысячи случаев световых ожогов, явившихся результатом ядерных взрывов в Японии, сообщалось только об их общем характере. Однако эти данные сейчас дополняются результатами опытов, проводимых главным образом на анестезированных свиньях как в лабораторных условиях, так и при испытательных взрывах ядерных бомб. Было обнаружено, что кожа белых свиней реагирует на световое излучение во многих отношениях так же, как кожа человека, и может быть сравнена с нею.

XI.31. Большинство световых ожогов в дополнение к тому, что они в основном ограничиваются площадью обнаженных частей тела, имеют значительно меньшую глубину поражения кожи, чем ожоги пламенем, и это вполне понятно, так как световое излучение, являющееся причиной таких ожогов, действует в течение очень короткого времени. Так, например, при атомных взрывах в Японии время действия светового излучения составляло примерно одну секунду. Очень высокая температура, образующаяся на поверхности

облучаемой кожи, действует также кратковременно. Вследствие этого световые ожоги отличаются от обычных целым рядом особенностей, кроме глубины поражения кожи. Упомянутые различия могут быть менее заметными, если световое излучение действует в течение более длительного промежутка времени, что имеет место, например, при взрыве бомб большой мощности.

XI.32. По тяжести световые ожоги в Японии варьировали от слабой эритемы (покраснения) до обугливания поверхностных слоев кожи. В отличие от ожогов, образующихся при относительно низких температурах, при световых ожогах не отмечалось отека (накопления жидкости) в более глубоких слоях ткани. В радиусе до 1800 *м* от эпицентра взрыва световые ожоги представляли собой депигментированные поражения (светлого цвета), но на больших расстояниях, от 1800 до 3600 *м*, за начальной эритемой развивалась пигментация в виде ореховой окраски кожи, иногда называемой «маской Хиросимы».

XI.33. Умеренные ожоги второй степени (и более легкие) обычно излечивались в течение четырех недель, однако более тяжелые ожоги часто осложнялись вторичной инфекцией, и процесс заживления значительно удлинялся. Даже при самых благоприятных условиях трудно предотвратить вторичную инфекцию ожогов, а после ядерных бомбардировок Японии положение было усугублено плохим уходом, недостаточными санитарными мерами и недостатком соответствующих медицинских учреждений. Возможно, что в некоторых случаях роль дополнительного фактора, отягчающего течение ожогов, играла ядерная радиация, которая, как указывалось, снижает сопротивляемость организма инфекции.

XI.34. Экспериментальные световые ожоги были получены как в лабораторных условиях, так и при опытных ядерных взрывах. Они оказывались в основном аналогичными ожогами, наблюдавшимся в Хиросима и Нагасаки. При очень тяжелых ожогах происходило обугливание центральной части пораженного участка кожи с образованием белого внешнего кольца, окруженного зоной эритемы. Отмечалась резкая демаркация пораженных тканей на поверхности кожи и в глубине, так что эти ожоги были совершенно непохожи на контактные, при которых на различных участках отмечается различная глубина поражения ткани. Поверхность световых ожогов была сухой, без значительного отека или серозного отделяемого.

XI.35. Другим явлением, наблюдавшимся в Японии после заживления тяжелых ожогов, было образование рубцов, т. е. сильное разрастание рубцовой ткани. Одно время высказывалось мнение, что это могло иметь отношение к воздействию ядерного излучения, но такая точка зрения теперь полностью отвергается. Усиленное образование рубцов было связано, по-видимому, со вторичной инфекцией ожогов и плохим питанием пострадавших. Кроме того, у японцев имеется известная предрасположенность к образованию

рубцов как расовая особенность. Так, например, среди населения Токио у многих образовались резко выраженные рубцовые изменения после ожогов в результате бомбардировки города зажигательными бомбами. Интересно отметить, что наблюдалась тенденция к постепенному исчезновению рубцов с течением времени.

Действие светового излучения на глаза

XI.36. Действие светового излучения на глаза разделяется на две категории: 1) ожоги сетчатой оболочки и 2) ослепление вспышкой. Ожоги сетчатой оболочки могут являться результатом концентрации на ней значительного количества световой энергии. Благодаря фокусирующему действию хрусталика на сетчатке может быть сконцентрировано достаточное для ожога количество энергии на таком расстоянии от места взрыва, при котором интенсивность светового излучения слишком мала для того, чтобы вызвать ожог кожи. При испытаниях ядерного оружия отмечены случаи ожогов сетчатки на расстояниях в 16 *км* от эпицентра взрыва, мощность которого по тротиловому эквиваленту составляла примерно 20 тыс. *т*. Полагают, что при соответствующих условиях подобные ожоги могут иметь место даже и на бóльших расстояниях.

XI.37. Действие светового излучения происходит настолько быстро, что такие защитные рефлексы, как сжатие век и сужение зрачка, имеют только частичное значение. Ночью, когда глаз адаптирован к темноте и зрачок расширен, ожоги сетчатки могут происходить на бóльших расстояниях от места ядерного взрыва, чем при дневном свете. Во всех случаях в результате действия светового излучения на глаза наблюдается временная потеря остроты зрения, при этом конечный исход зависит от серьезности ожога и в значительной степени от места его расположения. Если ожог слабый или он расположен на периферии чувствительной зоны сетчатки, острота зрения восстанавливается, но в более серьезных случаях может наступить значительная потеря зрения.

XI.38. Если во время взрыва глаза обращены непосредственно к огненному шару, то его изображение будет падать на центральную зону сетчатки, в которой образуются постоянные слепые точки, и зрение сильно пострадает. Однако такая вероятность мала, особенно при взрывах ядерных бомб небольшой мощности, при которых период светового излучения очень короткий. Значительно более вероятны временная «слепота от вспышки», или «ослепление», вызываемые действием на глаза яркого света, отражающегося от облаков, поверхности земли и от окружающих предметов. Это, однако, представляет собой только временное поражение, и зрение обычно довольно быстро восстанавливается.

XI.39. Интересно отметить, что среди людей, переживших атомное нападение в Хиросима и Нагасаки, поражение глаз световым

излучением не имело большого значения. Было много случаев временной слепоты в течение 2—3 часов после взрывов. Однако более серьезных поражений глаз обычно не встречалось.

XI.40. В некоторых случаях были зарегистрированы поражения глаз, известные под названием кератита (воспаление роговой оболочки). Симптомы этого заболевания, такие, как светобоязнь, ощущение постороннего тела в глазу, слезотечение и краснота, держались в течение периода от нескольких часов до нескольких дней. Из 1000 произвольно выбранных людей, находившихся во время взрыва на улице на расстоянии около 2000 *м* от эпицентра взрыва, только 42 человека имели кератит в течение первого дня. Более позднее появление кератита было дополнительно зарегистрировано в 14 случаях, в которых симптомы этой болезни впервые отмечались через месяц и более после взрыва. Возможно, что причиной позднего кератита являлась ядерная радиация, действие которой, как будет видно из нижеизложенного, иногда бывает замедленным.

XI.41. При обследовании 1000 пострадавших не было обнаружено ни одного случая тяжелого светового ожога роговицы, которое приводит к потере ее прозрачности. Такое положение является необычным, поскольку многие из обследованных имели серьезные ожоги лица. Так, приблизительно у одной четверти обследованных наблюдались ожоги кожи лица, иногда даже с повреждением бровей и ресниц. Несмотря на это, примерно через три года после атомного нападения роговые оболочки у этих людей были нормальными. Ни у кого в обследованной группе людей не отмечено поражений центральной зоны сетчатой оболочки, хотя некоторые из них утверждали, что в момент взрыва они смотрели именно в сторону огненного шара.

XI.42. Было высказано несколько предположений о причинах малого количества случаев тяжелых поражений глаз в Японии. Так, например, важным фактором защиты глаз от поражения, по-видимому, явился рефлекс моргания. Глубокое расположение глаз, и, в частности, нависающие верхние веки, содействовали снижению дозы воспринятого облучения. По теории вероятности только небольшая часть пораженных находилась лицом к месту взрыва, а благодаря яркому солнечному свету зрачки глаз у людей были сокращены, что снижало количество проникавшего в них светового излучения.

Поражения от воздействия ядерной радиации

XI.43. Радиоактивное излучение, образующееся при взрыве ядерной бомбы, представляет собой явление, которое отсутствует при взрывах обычных бомб. Поэтому вопрос о поражениях ядерной радиацией (или вопрос о так называемой лучевой болезни) будет здесь рассматриваться несколько подробнее. Вместе с тем подробное изложение этого вопроса не есть свидетельство того, что ра-

диоактивное излучение всегда будет являться наиболее важной причиной поражений при ядерном взрыве. Как было указано ранее, этот поражающий фактор не имел решающего значения в Японии, где бомбы были взорваны на высоте примерно 560 *м*. Имевшие место поражения радиоактивным излучением возникли в момент взрыва в результате воздействия первичной ядерной радиации. При этом действие остаточной радиации, образуемой продуктами ядерного распада, значения не имело. Как видно из главы IX, положение могло бы быть иным при наземных взрывах атомных бомб.

XI.44. Известно, что воздействие ядерных (или подобных им) излучений, например рентгеновских лучей, альфа- и бета-частиц, гамма-лучей и нейтронов, при соответствующей дозе может привести к поражению организма (§ VIII.22). После открытия рентгеновских лучей и радиоактивности в конце XIX века радиологи подвергались серьезному, а иногда и смертельному поражению радиацией, прежде чем были осознаны связанные с этим опасности. Однако с течением времени были разработаны меры по защите от вредного действия излучений, и поражения в результате облучения стали менее частыми. Тем не менее и до настоящего времени отмечаются случайные поражения персонала, обслуживающего радиографическое оборудование, мощные рентгеновские аппараты в промышленных лабораториях, циклотроны и ядерные реакторы, или лиц, работающих с радиоактивными или делящимися материалами.

XI.45. Вредное действие излучения связано с ионизацией (или возбуждением) в клетках, составляющих живую ткань. Как результат ионизации, некоторые из важных составных частей ткани повреждаются или разрушаются. Помимо этого, вновь образующиеся продукты могут действовать как клеточные яды. Изменения в клетках в результате действия ядерного (или ионизирующего) излучения включают в себя разрыв хромосом, набухание ядра и всей клетки, разрушение клетки, повышение вязкости протоплазмы и повышение проницаемости клеточной оболочки. В дополнение к этому излучение задерживает процесс деления клетки (митоз). Облученные клетки часто становятся неспособными делиться, и таким образом задерживаются нормальные процессы восстановления тканей.

XI.46. До применения атомного оружия в Хиросима и Нагасаки поражения радиоактивным излучением были редкими, и сравнительно мало было известно о явлениях, связанных с лучевой болезнью. В Японии, однако, многие жители подверглись воздействию ядерной радиации в дозах от незначительных до смертельных. Действие излучения часто сочеталось с другими видами поражений и шоком, так что симптомы лучевой болезни не всегда могли быть изолированы. Кроме того, ввиду большого количества пораженных и отсутствия надлежащих средств помощи детальные

наблюдения за пораженными и ведение точных записей были невозможны. Тем не менее на основе данных, собранных после атомных взрывов в Японии, были сделаны важные заключения относительно действия ядерного излучения на организм человека.

XI.47. После 1945 г. новые данные по этому вопросу поступали и из других источников. Этими источниками являлись опыты над животными и небольшое количество несчастных случаев в лабораториях, от которых пострадал примерно десяток человек. Однако наиболее детальные данные были получены при изучении воздействия излучения от продуктов ядерного распада, выпавших после опытного взрыва на Маршалловых островах. 1 марта 1954 г. (§ IX.86) были обследованы 250 человек, случайно подвергшихся облучению. В числе пораженных были жители Маршалловых островов, а также небольшая группа американских военнослужащих. Величины доз общего облучения, полученных этими людьми, колебались от весьма малых значений (14 *р*) до значений, которые в некоторых случаях могут вызвать поражения со смертельным исходом (175 *р*).

XI.48. Было установлено, что все излучения, вызывающие ионизацию (или возбуждение) непосредственно (альфа- и бета-частицы) или косвенно (рентгеновские лучи, гамма-лучи и нейтроны), одинаково могут вызывать лучевую болезнь. Однако, имея общую качественную сторону действия, различные излучения отличаются друг от друга по глубине проникания в ткани, а также по степени поражения, соответствующей определенному количеству поглощенной организмом энергии. Как указано в § VIII.31, эти отличия отдельных видов излучений выражаются (частично) при помощи так называемого показателя относительной биологической эффективности.

XI.49. Для бета-частиц показатель относительной биологической эффективности близок к единице. Это означает, что при равном количестве энергии, поглощенной живой тканью, бета-частицы оказывают на организм такое же поражающее действие, как рентгеновские лучи или гамма-лучи[1]. Показатель относительной биологической эффективности альфа-частиц оценивался в пределах от 10 до 20, однако полагают, что это слишком высокая оценка в отношении большинства случаев, представляющих интерес. Для нейтронов, испускаемых при взрыве ядерной бомбы, показатель относительной биологической эффективности применительно к острой лучевой болезни был принят равным 1,7 (§ VIII.69), однако этот показатель оказался значительно более высоким применительно к воздействию нейтронов на глаза и связанному с этим возникновению катаракт. Иными словами, нейтроны скорее, чем другие виды радиоактивных излучений, вызывают катаракты.

---

[1] Бета-частицы, излучаемые источниками, находящимися на поверхности тела или около него, могут также вызывать ожоги кожи (см. § XI.94).

Общее действие радиоактивного излучения

XI.50. Действие ядерных излучений на живые организмы зависит не только от общей дозы, но и от скорости облучения (от того, является ли облучение острым или хроническим), а также от размеров участка тела, подвергшегося облучению (см. § IX.38). Некоторые явления, связанные с облучением, например генетическое действие излучения (см. § XI.124 и далее), по-видимому, зависят только от общей дозы излучения и не зависят от времени, в течение которого оно воспринимается организмом. Другими словами, повреждения воспроизводительных клеток, вызываемые радиацией, имеют свойство кумулироваться. Однако в большинстве случаев биологическое действие данной общей дозы излучения снижается при увеличении времени облучения. Так, доза в 700 *р* окажется смертельной при однократном воздействии на все тело. Но такая же доза не вызовет смерти и выраженных расстройств в организме, если она будет растянута на 30 лет.

XI.51. Облучение небольшого участка кожи в течение 1 часа дозой рентгеновских лучей в 700 *р* вызовет определенную степень эритемы (покраснения). Однако, чтобы вызвать тот же внешний эффект путем двух более кратковременных облучений, разделенных друг от друга промежутком в 24 часа, каждую дозу необходимо довести примерно до 535 *р*, так что в этом случае потребуется общая доза в 1070 *р*. Если облучение производить в течение месяца, то ту же степень эритемы можно получить только при общей дозе около 2000 *р*. Это явление объясняется тем, что в коже непрерывно происходят восстановительные процессы, компенсирующие нормальный износ тканей. Отсюда следует, что бóльшая часть клеток, поврежденных (или полностью потерявших жизнеспособность) в результате облучения, замещается новыми клетками, и, таким образом, между двумя последующими дозами облучения имеет место некоторое естественное возобновление.

XI.52. Хотя процесс образования новых клеток в других тканях протекает не так быстро, как в коже, однако многие ткани организма, по-видимому, также обладают регенеративными способностями. Так, например, темп замещения зрелых клеток кроветворных тканей и тканей, выстилающих желудочно-кишечный тракт, так же, как и клеток спермы, весьма высок.

XI.53. Организм человека способен выдерживать непрерывное облучение малыми дозами от естественных источников без каких-либо выраженных вредных последствий (см. гл. IX). Как указывалось выше, это явление, по-видимому, объясняется относительно быстрым процессом замещения поврежденных клеток. Но если интенсивность облучения увеличивается, процесс восстановления отстает от процессов разрушения, в результате чего возникает поражение организма.

XI.54. Способность органов или системы органов к восстановле-

нию нормальных функций после воздействия радиоактивного излучения в большой степени зависит от их естественных регенеративных способностей вообще, независимо от вида поражений. Так, радиационные поражения мозга и почек в основном необратимы, в то время как поражения костного мозга, желудочно-кишечного тракта и кожи в значительной степени устраняются.

XI.55. Как уже указывалось, тяжесть поражения при одной и той же дозе облучения зависит от размеров и характера части тела, которая подверглась облучению. Так, кратковременное облучение дозой 700 *р* небольшого участка тела вызывает существенные местные изменения, но общее состояние здоровья облученного может не пострадать. Однако если доза в 700 *р* будет воспринята всем телом, то наиболее вероятным исходом облучения будет смерть. Объясняется это тем, что, когда облучение ограничено по площади, оставшиеся необлученными участки тела могут внести свою долю в процесс восстановления поврежденного участка. Но если облучению подвергнется весь организм, то поражаются многие органы и восстановление значительно затрудняется.

XI.56. Различные части тела имеют различную чувствительность к воздействию излучения, хотя, как будет показано ниже, имеются колебания в степени чувствительности у отдельных индивидуумов. Наиболее чувствительными к воздействию радиоактивного излучения являются лимфоидная ткань, костный мозг, селезенка, воспроизводительные органы и желудочно-кишечный тракт. Средней чувствительностью обладают кожа, легкие, почки и печень. Мышцы и полностью сформировавшиеся кости являются наименее чувствительными.

Действие острых доз излучения

XI.57. В этом разделе будут изложены некоторые из наиболее характерных результатов воздействия острой дозы излучения на весь организм. Наиболее характерным случаем острого облучения является действие начальной ядерной радиации, образующейся непосредственно после взрыва. Данные таблицы XI.57 относятся к человеку и основаны на материалах, полученных в Японии, на Маршалловых островах и при проведении экспериментов на животных. Указанный на диаграмме процент смертных случаев, соответствующий какой-либо конкретной дозе, может быть в некоторой степени снижен, если немедленно начать лечение. Данные таблицы XI.57 представлены в виде диаграммы на рис. XI.57; две кривые диаграммы показывают соответственно ожидаемый процент пораженных лучевой болезнью и процент пораженных со смертельным исходом, причем смерть наступает в течение около 30 дней после получения соответствующих доз острого облучения всего тела.

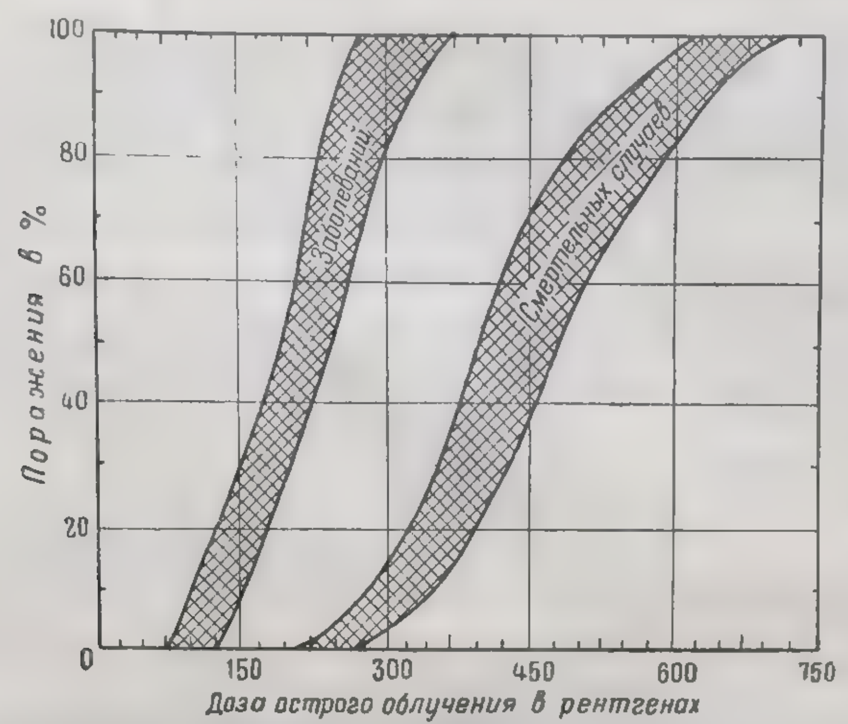


Рис. XI.57. Заболевания и смертельные случаи от острого облучения начальной ядерной радиацией в зависимости от дозы

Таблица XI.57

Ожидаемые поражения вследствие острого облучения всего организма

Доза острого облучения, *р*	Признаки поражения
От 0 до 50	Отсутствие признаков поражения, за исключением незначительных изменений в крови.
От 80 до 120	У 10% пораженных рвота и тошнота в первые сутки; чувство усталости без серьезной потери трудоспособности.
От 130 до 170	У 25% пораженных рвота и тошнота в первые сутки, после чего появляются другие симптомы лучевой болезни. Смертельные случаи, как правило, отсутствуют.
От 180 до 22	У 50% пораженных тошнота и рвота в первые сутки, после чего появляются другие симптомы лучевой болезни. Смертельные случаи, как правило, отсутствуют.
От 270 до 330	Почти у всех пораженных тошнота и рвота в первые сутки, после чего появляются другие признаки лучевой болезни. Смертность составляет около 20%; смерть наступает в течение двух — шести недель после облучения; оставшиеся в живых выздоравливают в течение примерно 3 месяцев.
От 400 до 500	У всех пораженных рвота и тошнота в первые сутки, после чего появляются другие признаки лучевой болезни. Смертность составляет около 50%; смерть наступает в течение одного месяца; остав-

Продолжение

Доза острого облучения, *р*	Признаки поражения
	шиеся в живых выздоравливают в течение примерно 6 месяцев.
От 550 до 750	У всех пораженных рвота и тошнота через четыре часа после облучения, после чего появляются другие симптомы лучевой болезни. Почти 100-процентная смертность; небольшое количество лиц, оставшихся в живых, выздоравливает в течение примерно 6 месяцев.
1000	У всех пораженных рвота и тошнота через 1—2 часа после облучения. 100-процентная смертность.
5000	Почти немедленная потеря боеспособности. 100-процентная смертность в течение одной недели.

XI.58. Необходимо отметить, что данные табл. XI.57 и диаграммы XI.57 не всегда могут быть применены ко всем конкретным случаям. Причина этого состоит в том, что при действии на организм излучения имеет значение не только величина дозы, но и ряд других известных и неизвестных нам факторов. Помимо колебаний биологической чувствительности к радиации отдельных индивидуумов, о чем будет указано ниже, имеются такие факторы, как возраст и состояние здоровья пораженных, глубина проникновения излучения в тело и в органы, а также положение тела по отношению к источнику излучения и связанная с этим возможность экранирования одной части тела другой. Эти и другие факторы, несомненно, будут изменять тяжесть полученных поражений при равных дозах облучения.

XI.59. Различия в чувствительности отдельных индивидуумов к излучению выражаются в том, что разные люди, получив одинаковую дозу излучения, при одних и тех же условиях реагируют на нее по-разному. Так, например, можно ожидать, что в результате острого облучения при дозе около 300 *р* погибнет только 20% пораженных. Остальные 80% будут страдать от лучевой болезни, но, вероятно, выздоровеют. Различия в действии излучения на отдельных индивидуумов приписываются так называемой **биологической изменчивости.** Данный фактор не является специфичным только применительно к ядерному излучению, а оказывает влияние и при других видах воздействия на организм. Существование этой естественной изменчивости вызывает необходимость установить среднюю чувствительность к поражающему фактору значительного количества людей. Невозможно предсказать, как данный индивидуум будет реагировать на специфическую дозу облучения.

Однако если условия точно определены, то ожидаемое среднее воздействие на большую группу людей установить можно.

XI.60. При изучении биологического действия острого облучения на весь организм обычно используется так называемая **средняя смертельная доза.** Это такая доза облучения всего организма, получение которой (большой группой людей) вызывает смертельные исходы у 50% пораженных; при этом смерть наступает примерно через один месяц после облучения. Остальные 50% будут болеть до 6 месяцев, но, вероятно, выздоровеют. Ввиду трудности установления величины доз, о которых говорилось выше, в настоящее время принято, что средняя смертельная доза облучения составляет 450 *р*. Эта величина, однако, может подвергнуться изменениям по мере получения дополнительных данных о действии острого облучения на человека.

XI.61. На основании результатов лабораторных и полевых опытов можно предполагать, что для средней смертельной дозы нет единой величины, соответствующей любым условиям. Так, по данным об изменении крови, полученным при исследовании действия выпавших радиоактивных продуктов ядерного распада на Маршалловых островах (см. § XI.73), был сделан вывод, что средняя смертельная доза должна составлять несколько меньше 450 *р*. С другой стороны, данные, собранные в Японии, указывают на более высокое значение этой дозы применительно к действию первичной ядерной радиации. Хотя обе эти величины содержат существенные неточности, различие между ними получается, возможно, за счет того, что продукты ядерного распада выпадали на большой площади и излучение действовало на людей со многих направлений; первичное же излучение в основном действовало с одного направления, так что некоторые части тела были экранированы другими частями. Таким образом, одна и та же доза облучения могла вызвать более тяжелые поражения в первом случае, для которого средняя смертельная доза будет меньше. В качестве величины средней смертельной дозы для целей, поставленных настоящим исследованием, принимается доза облучения в 450 *р*.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

Поражающее действие смертельных доз облучения (свыше 700 *р*)

XI.62. Облучение всего тела очень высокими дозами радиации, например дозой в 5000 *р* и выше, ведет к быстрому поражению центральной нервной системы. Симптомами такого поражения являются перевозбуждение, атаксия (отсутствие координации движений), затрудненность дыхания и ступор (оцепенение). Почти

немедленно наступает состояние прострации[1], которое заканчивается смертью через несколько часов или дней (до одной недели) после облучения. Если доза облучения находится в пределах 700—1000 *р*, то самые ранние симптомы поражения отмечаются со стороны органов пищеварения в форме тошноты и рвоты в течение первых трех-четырех часов. Чем больше доза, тем раньше появляются эти симптомы. Вслед за этим более или менее быстро развивается прострация, диаррея (понос), анорексия (отсутствие аппетита и отвращение к пище) и повышенная температура. Как видно из полученных в Японии данных, диаррея у пораженных является частым явлением и носит тяжелый характер. Стул вначале бывает водянистым, но позднее имеет тенденцию переходить в кровавый.

XI.63. Чем раньше развиваются отмеченные выше симптомы лучевой болезни, тем вероятнее смертельный исход. Хотя болевых ощущений в течение первых нескольких дней не бывает, больные испытывают чувство неудобства и беспокойства, сопровождающееся заметной депрессией и общей разбитостью. В некоторых случаях при меньшей дозе облучения за ранней стадией тяжелой лучевой болезни следует так называемый **скрытый** период в 2—3 (или более) дня, в течение которых у больного не проявляется внешних симптомов поражения, хотя в организме происходят глубокие изменения, особенно в тканях кроветворных органов. После скрытого периода болезни следует рецидив прежних симптомов, часто сопровождающийся бредом или коматозным[2] состоянием и заканчивающийся смертью обычно в пределах двух недель.

XI.64. Другими симптомами тяжелого лучевого поражения являются вторичная инфекция и тенденция к спонтанным внутренним кровоизлияниям в конце первой недели. Одновременно часто наблюдается отечность и воспаление горла. Выпадение волос (эпиляция), главным образом на голове, обычно наблюдается к концу второй недели. Развитие лучевой болезни в тяжелой форме у японцев сопровождалось повышением температуры тела. Температура в большинстве случаев повышалась постепенно между пятым и седьмым днями, а иногда и на третий день после облучения. Повышенная температура обычно удерживалась до момента смерти. Имелись также резкие изменения в крови больного, о чем будет указано ниже (§ XI.73). Посмертное исследование обнаруживало дегенеративные изменения в яичках и яичниках. В отдельных случаях отмечалось также изъязвление миндалин и слизистой оболочки толстых кишок.

---

[1] Прострация — угнетенное состояние, сопровождающееся полным упадком сил и безразличным отношением к окружающему. (*Прим. ред.*)

[2] Кома — бессознательное состояние, обусловленное сильным угнетением центральной нервной системы. (*Прим. ред.*)

Поражающее действие излучения в дозах 300—500 *р*

XI.65. При дозах общего облучения порядка 300—500 *р* также развивается тяжелая лучевая болезнь, которая, однако, не всегда заканчивается смертью. Первоначальные симптомы поражения бывают такие же, как и у облученных более высокими дозами, а именно: тошнота, рвота, диаррея, потеря аппетита и общее тяжелое состояние. Однако эти симптомы развиваются медленнее и имеют менее тяжелый характер. Через 1—2 дня после облучения симптомы поражения исчезают и начинается скрытый период болезни продолжительностью от нескольких дней до двух недель, в течение которых больные чувствуют себя относительно хорошо, хотя в крови происходят глубокие изменения. Вслед за этим периодом симптомы заболевания, включая лихорадочное состояние, диаррею и постепенное повышение температуры, появляются вновь.

XI.66. Начиная примерно со второй или третьей недели после облучения, отмечается тенденция к развитию кровоизлияний в различные органы, а также к подкожным кровоизлияниям. Особенно часто наблюдаются спонтанные кровотечения во рту и по ходу желудочно-кишечного тракта. В результате кровоизлияния в почки или в мочевыводящие пути в моче может появляться кровь. Кровоизлияния происходят в основном в результате снижения уровня содержания в крови некоторых компонентов и связанного с этим нарушения механизма свертывания крови (см. § XI.79). Выпадение волос после облучения начинается примерно через две недели, т. е. непосредственно за латентным (скрытым) периодом.

XI.67. Серьезным осложняющим фактором является подверженность инфицированию ран, ожогов и других повреждений. Инфекция в значительной степени объясняется уменьшением количества белых кровяных телец и заметной депрессией иммунологической активности организма. В результате микробной инфекции у пораженных после скрытого периода появляются изъязвления на губах, которые в последней стадии болезни распространяются по всему желудочно-кишечному тракту.

XI.68. В наиболее серьезных случаях лучевой болезни в Японии отмечалось тяжелое истощение с лихорадочным состоянием и бредом. При этом через 2—12 недель после облучения болезнь заканчивалась смертью. Больные, выжившие в течение 3—4 месяцев и не имевшие осложнений в виде туберкулеза, легочных и других заболеваний, постепенно выздоравливали. У выздоровевших выпадение волос прекращалось. Примерно через 3—4 года после атомного нападения обследование 824 оставшихся в живых показало, что состав их крови ничем существенно не отличался от состава крови жителей города, не подвергавшихся облучению. Вопрос об отдаленных последствиях лучевой болезни, как-то: катарактах и лейкемии, будет рассмотрен ниже.

Поражающее действие излучения в дозах 100—250 *р*

XI.69. Общее облучение дозами радиации порядка 100—250 *р* вызывает лучевую болезнь, которая в большинстве случаев заканчивается выздоровлением. Действию таких доз радиации подвергались жители Хиросимы и Нагасаки, находившиеся на некотором расстоянии от эпицентра взрыва. Из 250 человек, подвергшихся облучению от выпавших продуктов ядерного распада после опытного взрыва на Маршалловых островах 1 марта 1954 г., 64 человека

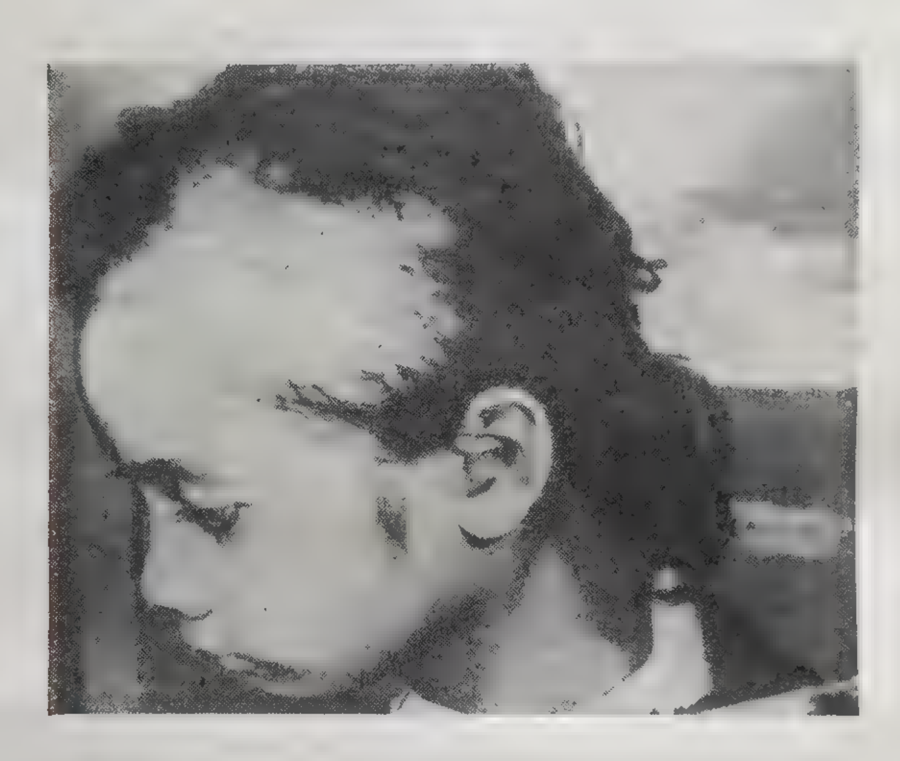


Рис. XI.70. Выпадение волос у ребенка, подвергшегося гамма-облучению в дозе около 175 *р*

также получили дозу радиации порядка 100—250 *р*. Необходимо отметить, что в последнем случае, строго говоря, облучение не являлось острым, как это определено в § IX.38, так как воздействие радиации продолжалось примерно 45 часов. Вместе с тем следует учесть, что более половины дозы облучения было получено пострадавшими в течение первых 24 часов, и симптомы поражения, несомненно, были аналогичны симптомам острого облучения такой же дозой.

XI.70. Лучевая болезнь в результате облучения дозами радиации порядка 100—250 *р* имеет в основном ту же клиническую картину, что и болезнь после облучения более высокими дозами. Однако начальный период болезни выражен менее резко. В первый день после

облучения обычно отмечается тошнота, рвота и диаррея. Затем следует скрытый период, длящийся до двух недель и более. В течение этого времени пораженный не теряет трудоспособности и может продолжать свою обычную трудовую деятельность. После этого вновь появляются обычные симптомы — потеря аппетита, плохое самочувствие, выпадение волос (рис. XI.70), диаррея и кровоизлияния, но они не являются очень тяжелыми. Изменения в крови, вызываемые облучением, происходят во время скрытого периода болезни и удерживаются в течение некоторого времени в дальнейшем. Если нет осложнений, выздоровление наблюдается почти во всех случаях. Рост волос возобновляется примерно через два месяца. Чем тяжелее форма проявления симптомов ранней стадии лучевой болезни, тем дольше протекает процесс выздоровления. Надлежащий уход и применение антибиотиков при наличии клинических к тому показаний может значительно ускорить полное выздоровление даже в тяжелых случаях лучевой болезни.

Действие малых доз излучения

XI.71. Однократное облучение всего тела дозой порядка 25—100 *р* может вызвать появление легких, а иногда и весьма неопределенных симптомов. В некоторых случаях единственным отчетливым признаком поражения являются изменения в крови, которые регистрировались даже после воздействия радиации в дозе не более 14 *р*. Потери трудоспособности у облученных малыми дозами обычно не наблюдается, и подвергшиеся воздействию таких доз люди могут продолжать свою обычную трудовую деятельность.

Диагностика лучевой болезни

XI.72. Наиболее яркими и ранними симптомами лучевой болезни являются тошнота, рвота и диаррея. Тяжесть и длительность этих симптомов находятся в прямой зависимости от степени облучения и в обратной зависимости от вероятности выздоровления. Процессы, происходящие в скрытом периоде, длительность этого периода и дальнейшее течение лучевой болезни также зависят от дозы облучения. В табл. XI.72 даны наиболее характерные признаки лучевой болезни. Следует отметить, что эти данные могут варьировать. В частности, могут изменяться в зависимости от индивидуума сроки появления и тяжесть симптомов.

Таблица XI.72

Обзор клинических симптомов лучевой болезни

Время после облучения	Выздоровление невозможно (700 *р* или больше)	Выздоровление возможно (от 550 до 300 *р*)	Выздоровление вероятно (от 250 до 100 *р*)
1-я неделя	Тошнота, рвота и диаррея в первые несколько часов. В некоторых случаях определенных симптомов нет (скрытый период). Диаррея. Геморрагия (кровотечение). Пурпура (мелкие кровоизлияния в толще кожи и слизистых оболочках).	Тошнота, рвота и диаррея в первые несколько часов. Определенных симптомов нет (скрытый период).	Возможна тошнота, рвота и диаррея в течение первых суток.
2-я неделя	Воспаление слизистой оболочки рта и глотки, лихорадочное состояние, быстрое истощение, смерть (вероятная смертность — 100%).	Выпадение волос, потеря аппетита и общее недомогание, лихорадочное состояние.	Определенных симптомов нет (скрытый период).
3-я неделя		Геморрагия, пурпура, петехии, кровотечение из носа, бледность, воспаление слизистой оболочки рта и глотки, диаррея, истощение.	Выпадение волос, потеря аппетита и недомогание, воспаление слизистой оболочки глотки, геморрагия, пурпура, петехии (точечные кровоизлияния в толще кожи и слизистых оболочках), бледность, диаррея, умеренное истощение.
4-я неделя		Смерть в наиболее тяжелых случаях. При дозе облучения в 450 *р* вероятная смертность — 50%.	Выздоровление возможно примерно через 3 месяца, если отсутствуют такие отягчающие болезнь факторы, как слабое здоровье до облучения, сопутствующие травмы и инфекция.

Гематологические признаки поражения радиоактивным излучением

XI.73. Среди биологических последствий общего однократного облучения организма наиболее характерными являются изменения в крови. Эти изменения в слабо выраженной форме наблюдались даже после облучения дозой только в 14 *р*; с повышением данной

дозы изменения в крови становились более заметными. Много сведений о гематологической реакции человека на излучение было получено после ядерных взрывов в Японии, а также из анализа несчастных случаев в лабораториях. Положение, которое создалось на Маршалловых островах в марте 1954 г., позволило очень тщательно изучить действие малых и умеренных доз облучения (до 175 *р* включительно) на кровь человека. Приведенные ниже сведения по рассматриваемому вопросу в основном согласуются с данными, полученными в Японии, но они основаны в большей мере на материалах обследования жителей Маршалловых островов.

XI.74. Одним из наиболее ярких симптомов изменения крови в результате воздействия радиоактивных излучений является уменьшение количества лейкоцитов. Лейкоциты, или белые кровяные тельца, играют большую роль в сопротивлении организма болезнетворным микробам. Во время инфекционных заболеваний количество лейкоцитов увеличивается, так как они требуются для борьбы с вторгающимися микроорганизмами. Потеря этой способности бороться с вторжением микробов независимо от того, будет ли она вызвана излучением или каким-либо другим поражением, очень серьезна, и микробы могут в результате этого быстро размножаться, вызывая серьезные последствия. Имеются различные виды лейкоцитов с различными специализированными функциями, но все они обладают общей для них способностью сопротивления инфекции, удаления токсических продуктов из организма или тем и другим. Отдельным видам лейкоцитов даны названия в соответствии с их внешним видом, например гранулоциты, или с их происхождением — так называемые лимфоциты, или по их сродству с кислотами или щелочами, например ацидофилы, нейтрофилы и базофилы.

XI.75. После воздействия радиации в сублетальных (несмертельных) дозах (около 250 *р* или менее) количество лейкоцитов в первые 1—2 дня повышается, а затем падает ниже нормального уровня. В последующие 5—6 недель уровень содержания лейкоцитов колеблется, не снижаясь до минимальных значений, а иногда превышая нормальное содержание. В течение седьмой или восьмой недели количество лейкоцитов стабилизируется на низких уровнях и примерно в это же время достигает своего минимума. В последующие недели наблюдается тенденция к повышению их содержания, но для возвращения к норме может потребоваться несколько месяцев или более.

XI.76. Нейтрофилы, защищающие организм от вторжения бактерий, продуцируются главным образом в костном мозгу. Содержание нейтрофилов изменяется пропорционально изменению общего числа белых кровяных телец, так что первоначальное увеличение количества последних, по-видимому, должно быть отнесено за счет мобилизации нейтрофилов. Полного возвращения количества нейтрофилов к норме не наблюдается в течение нескольких месяцев.

XI.77. Лимфоциты вырабатываются в лимфоидной ткани, и в частности в лимфотических узлах и селезенке. В противоположность нейтрофилам количество лимфоцитов резко падает вскоре после облучения и в течение нескольких месяцев остается ниже нормы. Восстановление нормального количества лимфоцитов может потребовать многих месяцев и даже лет. Если судить по полученным в Японии данным, то через три или четыре года после облучения содержание лимфоцитов у облученных существенно не отличалось от их содержания у людей, не подвергавшихся воздействию ядерной радиации.

XI.78. Как указывалось выше, функции лейкоцитов заключаются в защите организма от болезнетворных микробов и в удалении токсических продуктов. Неспособность костного мозга и лимфоидной ткани вырабатывать соответственно гранулоциты и лимфоциты в результате облучения означает, что существенно важный защитный механизм организма в значительной мере выводится из строя. Этим отчасти объясняется сильная подверженность облученных заражению различными микробами, о чем говорилось ранее. Другими факторами, снижающими сопротивляемость облученных к воздействию микробов, является недостаточная способность пораженного организма вырабатывать антитела.

XI.79. Другим важным изменением в крови облученных является уменьшение количества кровяных пластинок — составной части крови, имеющей важную роль в процессе ее свертывания. В отличие от лейкоцитов количество кровяных пластинок начинает уменьшаться сразу же после облучения, падает неуклонно и у пораженных сублетальными дозами радиации достигает минимума примерно к концу первого месяца. При более высоких дозах облучения количество кровяных пластинок уменьшается более быстро и достигает минимума через более короткий промежуток времени. Восстановление количества пластинок до нормы протекает медленно и занимает несколько месяцев и даже лет после облучения. Снижением содержания пластинок в крови может быть частично объяснено появление при лучевой болезни кровотечений и пурпуры.

XI.80. После облучения в крови снижается также содержание эритроцитов (красных кровяных телец), в результате чего появляются симптомы анемии, например бледность. Однако изменение в количестве эритроцитов не является так резко выраженным, как изменения в количестве белых кровяных телец и пластинок, особенно при облучениях дозами в пределах от 200 до 400 *р*. В то время как белые кровяные тельца и пластинки быстро реагируют на облучение, количество эритроцитов в течение первых нескольких дней мало или совсем не изменяется. В последующем наблюдается снижение их количества, которое может продолжаться на протяжении двух-трех недель. С началом процесса выздоровления от лучевой болезни количество эритроцитов увеличивается.

XI.81. В качестве показателя тяжести поражения, в особенности

при сублетальных дозах, содержание в крови нейтрофилов имеет ограниченное значение, так как этот показатель может колебаться в широких пределах и становится наиболее резко выраженным лишь через несколько недель после облучения. В этом отношении большую ценность представляют данные о количестве лимфоцитов, особенно при низких дозах облучения, поскольку количество лимфоцитов уменьшается уже через несколько часов. Однако следует отметить, что разница в степени снижения содержания лимфоцитов при высоких и низких дозах облучения относительно мала. Отсюда следует, что подсчет белых кровяных телец в крови не дает возможности сразу определить тяжесть поражения.

XI.82. Уменьшение количества кровяных пластинок после облучения имеет закономерный характер, и минимальное их содержание у пораженных сублетальными дозами отмечается приблизительно через одно и то же время после облучения. Далее, при упомянутых дозах радиации степень уменьшения содержания пластинок по сравнению с нормой в общем грубо пропорциональна предполагаемой дозе облучения. Исходя из этого, можно сказать, что подсчет количества пластинок будет служить удобным и относительно простым методом определения серьезности поражения при дозах облучения в пределах сублетальных. Основной недостаток этого способа заключается в том, что значительное снижение количества пластинок отмечается только по истечении некоторого времени после облучения.

ОТДАЛЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАДИОАКТИВНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Катаракты

XI.83. Некоторые последствия воздействия излучения на организм могут проявиться только через несколько лет после облучения. Кроме генетических факторов, такими последствиями могут быть образования катаракт, лейкемия и задержка в развитии детей, облученных в утробе матери. Данные относительно поздних последствий облучения были получены в результате длительного изучения материалов, полученных в Японии; при этом исследования проводились главным образом под руководством комиссии по изучению последствий атомных взрывов [1].

XI.84. У жителей Хиросима и Нагасаки, находившихся во время взрывов в радиусе около 900 *м* от эпицентра взрыва, было зарегистрировано больше 100 случаев незначительного помутнения хрусталика без существенного нарушения зрения. Только у небольшого числа пострадавших непрозрачность хрусталика была достаточно серьезной и требовала операции. Изученные катаракты аналогичны

[1] Комиссия по изучению последствий атомных взрывов Национального исследовательского совета США финансируется комиссией по атомной энергии. Одной из ее задач является изучение отдаленных последствий радиоактивного облучения.

катарактам, возникающим в результате воздействия на глаза больших доз рентгеновских и гамма-лучей, поэтому причиной их, вероятно, явилась первичная ядерная радиация. Быстрые нейтроны обладают высокой биологической активностью, вызывающей помутнение хрусталика (см. § XI.49), и именно этот вид излучения, по-видимому, является основной причиной имевших место в Японии случаев катаракт.

XI.85. Бо́льшая часть людей, находившихся на таком же расстоянии от эпицентра взрыва, как и те лица, которые имели катаракты, умерли от световых ожогов, механических травм или лучевой болезни. Следовательно, наиболее вероятно, что все (или почти все), пережившие взрыв, у которых позднее образовались катаракты, подверглись воздействию по меньшей мере умеренных доз излучения. Это подтверждается также тем, что практически у всех лиц, имевших катаракты, отмечалось полное выпадение волос, а у многих возникали характерные симптомы лучевой болезни.

Лейкемия

XI.86. Изучение данных о смертности среди врачей показало, что лейкемия — заболевание, связанное с повышенной выработкой белых кровяных телец,— значительно чаще является причиной смерти врачей-радиологов, чем других врачей. В связи с этим стали считать, что частое (хроническое) воздействие на организм умеренных доз ядерного излучения может вызывать лейкемию. Данные, полученные в Японии, свидетельствовали о возможности возникновения лейкемии и в результате воздействия однократной высокой (острой) дозы облучения. Первые определенные данные о повышенной заболеваемости лейкемией среди жителей Хиросимы и Нагасаки были получены в 1947 г. Таким образом, между моментом облучения и развитием симптомов заболевания прошло по меньшей мере два года. Количество новых зарегистрированных случаев лейкемии в последующие годы регулярно повышалось.

XI.87. Практически все случаи лейкемии, которые могли быть отнесены за счет облучения ввиду наличия других симптомов лучевой болезни, наблюдались среди людей, находившихся в зоне радиусом около 1400 *м* от эпицентра взрыва. В этом районе минимальная доза общего облучения, по-видимому, приближалась к средней смертельной дозе в 450 *р*. Обследование значительного количества больных лейкемией показало, что заболеваемость среди облученных составляла в среднем около одного случая на 500 человек по сравнению с одним случаем на 50 тысяч человек среди населения Японии, не подвергавшегося облучению.

Задержка в развитии детей

XI.88. У японских женщин, облученных во время беременности достаточно высокими дозами радиации, наблюдалось заметное по-

вышение количества мертворожденных. Повысилась также смертность новорожденных и младенцев. Изучение состояния детей через четыре-пять лет после атомного нападения показало несколько повышенное количество случаев задержки умственного развития. Матери этих детей находились на таком расстоянии от эпицентра взрыва, что должны были подвергнуться воздействию дозы ядерного излучения по меньшей мере в 450 *р*. У многих детей отмечено неправильное развитие зубов, что приписывалось повреждению их корней.

XI.89. Сравнение данных проведенного в 1952 г. обследования состояния детей, подвергшихся облучению (возраст их в момент облучения колебался примерно от 1 года до 14 лет), и детей того же возраста, не подвергавшихся облучению, показало, что первая группа детей имела меньший средний вес тела и более низкий рост, половая зрелость их достигла меньшей степени развития, чем у второй группы. С другой стороны, при постановке различных проб на нейтромышечную координацию и мышечную силу существенных различий обнаружено не было.

XI.90. В связи с вопросом о развитии детей необходимо отметить, что дети, зачатые в Японии подвергшимися облучению родителями, по-видимому, были совершенно нормальными. Высказывавшиеся одно время опасения о возможном повышении среди таких детей анормальных случаев фактами подтверждены не были (см. § XI.124).

Влияние облучения на другие виды поражений

XI.91. Комбинация поражения ядерной радиацией с другими видами поражений, как можно ожидать, вызовет увеличение случаев шока. Так, например, комбинация сублетального облучения и умеренных световых ожогов будет вызывать более ранний и более тяжелый шок, чем это могло быть только при одном ожоге. Заживление ран будет замедлено вследствие их подверженности сопутствующей инфекции и в силу других причин. Инфекция, с которой здоровый организм мог бы справиться, у облученных может повлечь за собой смертельный исход.

ДЕЙСТВИЕ ОСТАТОЧНОЙ ЯДЕРНОЙ РАДИАЦИИ

Гамма-излучение

XI.92. Биологическое действие остаточной ядерной радиации аналогично действию первичной радиации. Однако некоторые вопросы, связанные с природой продуктов деления, требуют специального рассмотрения. Ниже будут рассмотрены: 1) остаточное гамма-излучение; 2) вещества, испускающие бета-частицы, и 3) внутренние источники излучения.

XI.93. Хотя гамма лучи, испускаемые продуктами деления, обладают более низкой энергией и несколько меньшей проникающей способностью, чем гамма-лучи первичной ядерной радиации, биологическое действие их одинаково. Однако, как указывалось в § XI.61, гамма-излучение от радиоактивного выпадения может вызвать более тяжелое поражение, чем первичное гамма-излучение при действии их в равных дозах. В последнем случае бо́льшая часть излучения поступает с одного направления, а именно от места взрыва бомбы, ввиду чего возможно частичное экранирование одной части тела другой. Излучение от радиоактивного выпадения действует на организм со многих направлений, и такое экранирование имеет меньшее значение. Тот факт, что остаточное излучение действует на организм более длительное время, чем первичное излучение, большого значения не имеет, так как большая часть дозы от выпавших продуктов ядерного распада будет получена в течение первых одного-двух дней, непосредственно следующих за ядерным взрывом. Естественное восстановление организма в течение этого времени незначительно, и полученную дозу излучения можно считать практически острой дозой.

Вещества, излучающие бета-частицы

XI.94. Поражения организма излучением бета-частиц из внешних источников может происходить двумя путями. Во-первых, продукты атомного распада, испускающие бета-частицы, приходя в контакт с кожей и оставаясь на ней в течение длительного времени, могут вызывать радиоактивное поражение, иногда называемое «бета-ожогом». Во-вторых, в районе атомного взрыва организм будет подвергаться воздействию бета-частиц, излучаемых продуктами атомного распада, которыми заражена внешняя среда. Одежда будет в значительной мере ослаблять действие этих излучений, тем не менее наружные слои кожи будут облучены в сильной степени, и при некоторых обстоятельствах могут возникнуть серьезные ожоги.

XI.95. Ценная информация относительно бета-ожогов была получена в результате наблюдений за течением этого вида ожогов у жителей Маршалловых островов, подвергшихся воздействию радиации от продуктов атомного распада в марте 1954 г. Радиоактивный материал на некоторых островах стал выпадать примерно через 5 часов после взрыва. Этот материал представлял собой белый порошок и состоял в основном из извести (окиси кальция), образовавшейся в результате разложения коралла (углекислого кальция) под воздействием температуры. Жители острова сначала не придали значения этому явлению. Так как погода была жаркой и влажной, то они оставались на открытом воздухе; их тела были влажны и относительно мало прикрыты одеждой. В результате этого местные жители оказались сильно зараженными радиоактивным мате-

риалом, который длительное время находился в соприкосновении с их кожными покровами и волосами. Поскольку жители островов, как правило, обуви не носили, их босые ноги постоянно подвергались заражению выпадавшими на землю радиоактивными веществами.

XI.96. В течение первых 24—48 часов многие из подвергшихся наибольшему воздействию излучения почувствовали ощущение зуда и жжения в коже. Эти симптомы были более легкими у тех, кто был менее заражен радиоактивными веществами. Через день или два все кожные симптомы исчезли, но по истечении двух-трех недель на участках тела, которые подверглись заражению радиоактивными частицами, наблюдались выпадение волос и изъязвления.



Рис. XI.97а. Кожный покров шеи через месяц после воздействия бета-излучения

Эритема не отмечалась как в ранних, так и в поздних стадиях поражения, хотя этого можно было бы ожидать. Возможно, что она могла быть затенена естественной окраской кожи жителей островов.

XI.97. Первым показателем поражения кожи была повышенная пигментация в форме темных пятен и приподнятых над поверхностью кожи высыпаний (макулы, папулы и рельефные пятна). Эти поражения развивались на участках кожи, не защищенных одеждой, в такой последовательности: поражение кожных покровов головы (с выпадением волос), шеи, плеч, верхних конечностей, нижних конечностей и туловища. Чаще всего наблюдались выпадение волос и поражение кожи на голове, шее и ногах (рис. XI.97а и б).

XI.98. Кроме отмеченных поражений, у жителей Маршалловых островов, а также у американских негров очень часто наблюдалась синевато-коричневая пигментация ногтей. Это явление, по-видимому, специфично для темнокожих рас, так как оно не наблюдалось

ни у одного из белых американцев, которые одновременно подвергались облучению. Пигментация ногтей наблюдалась в ряде случаев при отсутствии поражений кожи. Весьма вероятно, что это явление было вызвано скорее действием гамма-лучей, чем бетта-частиц, поскольку тот же самый эффект отмечался у больных с темной кожей после облучения их рентгеновскими лучами.



Рис. XI.97б. Кожный покров нижних конечностей через месяц после воздействия бета-излучения

XI.99. Поражения кожи в большинстве случаев были поверхностными и не сопровождались образованием пузырей. Микроскопическое исследование через 3—6 недель показало, что поражение было особенно заметным в верхних слоях кожи (эпидермисе), в то время как более глубоко расположенные слои были затронуты значительно меньше. Это вполне согласуется с коротким пробегом бета-частиц в живой ткани. После образования сухого струпа наступало быстрое заживление; при этом оставались депигментированные пятна, окруженные зоной повышенной пигментации с неправильными очертаниями. В течение последующих нескольких недель постепенно восстанавливалась нормальная пигментация.

XI.100. У лиц, подвергшихся сильному заражению радиоактивными веществами, развивались (обычно на ногах или шее) более глубокие поражения кожи, сопровождавшиеся слабым чувством жжения, зудом и болью. Пораженные участки кожи были влаж-

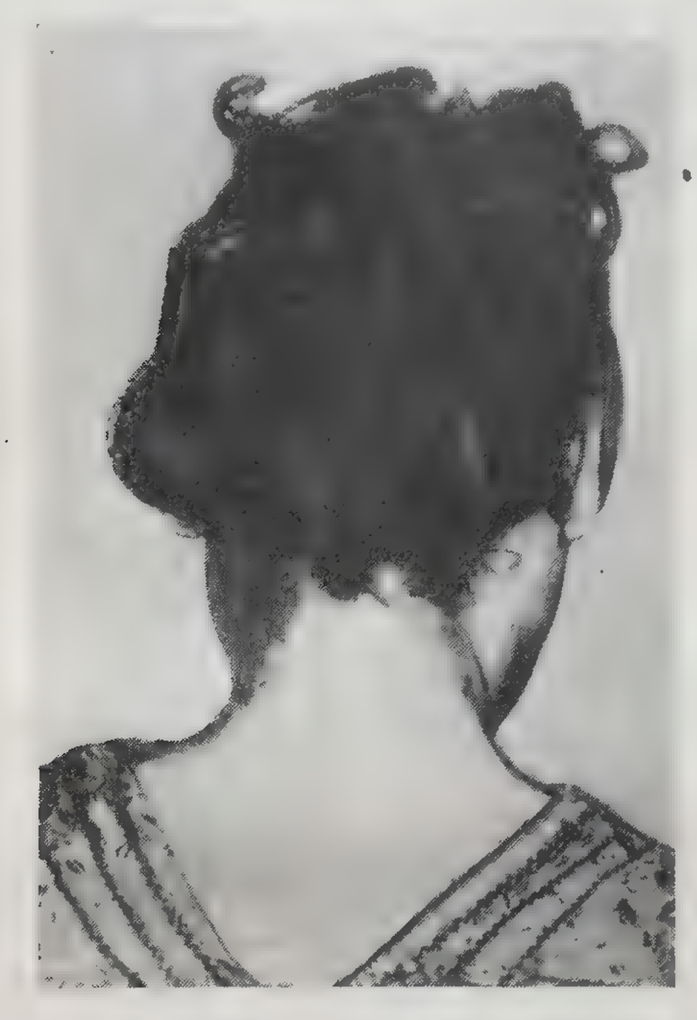


Рис. XI.100а. Кожный покров шеи через год после воздействия бета-излучения (см. также рис. XI.97а)

ными, мокнущими, на них появлялись язвы, в дальнейшем они покрывались твердой сухой коркой. Однако большинство таких поражений быстро заживало в результате обычного лечения, применяемого при заболеваниях кожи, не связанных с воздействием излучения. Ненормальная пигментация на участках кожи, подвергшихся поражению, удерживалась в некоторых случаях до одного года (рис. XI.100а и б).

XI.101. Возобновление роста волос обычного цвета и строения начиналось примерно через 9 недель после облучения; при этом

волосяной покров полностью восстанавливался через 6 месяцев. К этому же времени в большинстве случаев исчезала ненормальная пигментация на ногтях.



Рис. XI.100б. Кожный покров нижних конечностей через 6 месяцев после облучения (см. также рис. XI.97б)

Внутренние источники излучения

XI.102. В случае пребывания на местности, зараженной радиоактивными веществами, эти вещества могут попадать в организм через пищеварительный тракт (с зараженной пищей и водой), через легкие (с зараженным воздухом) или через раны и царапины. В целом биологическое действие ядерных излучений, исходящих от внутренних источников, аналогично действию излучения от внешних источников. Однако необходимо отметить, что даже весьма малое количество радиоактивного материала, находящегося внутри организма, может нанести тяжелое поражение.

XI.103. Прежде всего облучение различных органов и тканей внутренними источниками является постоянным, изменяющимся только от уменьшения в организме количества активного материала в результате физических (радиоактивный распад) и биологических

(выделение) процессов. Далее, ткани организма, воспринимающие действие радиации, ближе расположены к источнику излучения и не экранированы какими-либо материалами. Это особенно важно учитывать при альфа- и бета-излучениях. Альфа- и бета-частицы, действуя извне, задерживаются поверхностными слоями кожи и не могут достичь чувствительных участков организма. Но если источники альфа- и бета-излучений, как, например, плутоний (испускающий альфа-частицы) или продукты ядерного распада (испускающие бета-частицы), действуют изнутри, то они могут потерять всю свою энергию на небольшом, но, возможно, весьма чувствительном участке ткани организма, вызывая при этом значительное его поражение.

XI.104. Отмеченный факт усугубляется тем, что некоторые химические элементы имеют тенденцию концентрироваться в специфических клетках или тканях, подчас обладающих весьма большой чувствительностью к ядерному излучению. Судьба радиоактивного изотопа, который попал в кровяное русло, будет зависеть от его химической природы. Радиоактивные изотопы элемента, являющегося нормальной составной частью тканей организма, будут проходить те же самые процессы метаболизма, как и стабильные изотопы данного элемента. Так, например, йод, как радиоактивный, так и нерадиоактивный, имеет тенденцию концентрироваться в щитовидной железе.

XI.105. Радиоактивный изотоп элемента, обычно не содержащегося в тканях организма, будет вести себя так, как ведет себя сходный с ним по химическим свойствам элемент, нормально присутствующий в организме. Так, радиоактивные изотопы стронция и бария, будучи химически подобными кальцию, в значительной мере отлагаются в кальцинированной ткани костей. Изотопы редкоземельных элементов, например церия, составляющего существенную часть продуктов ядерного распада, и плутония, содержащегося в этих продуктах в небольших количествах, также отлагаются в костях. Так как эти элементы не являются химическими аналогами кальция, то они отлагаются в меньших количествах и в других структурных элементах кости, чем стронций и барий (рис. XI.105). Следует отметить, что отлагающиеся в костях радиоактивные изотопы обладают весьма высокой потенциальной опасностью, так как могут вызывать повреждение чувствительного костного мозга, в котором вырабатываются многие из кровяных клеток. Результатом поражения кроветворной ткани является снижение количества кровяных клеток, что вредно сказывается на всем организме.

XI.106. Для того чтобы превратиться во внутренние источники излучения, радиоактивные материалы должны получить доступ в кровяное русло, из которого они затем могут попадать в кости, печень и т. д. Пока радиоактивные вещества находятся в легких, желудке и кишках, их следует считать скорее внешними, чем внутренними источниками излучения. Интенсивность проникания радиоактивных продуктов в кровь будет зависеть от двух основных

факторов: размеров радиоактивных частиц и их растворимости в жидкостях организма. Возможность отложения радиоактивных элементов в какой-либо определенной ткани зависит от химических свойств этих элементов, как было указано выше. Элементы, которые не обладают тенденцией кумулироваться в организме, сравнительно быстро выводятся в результате естественных процессов метаболизма.

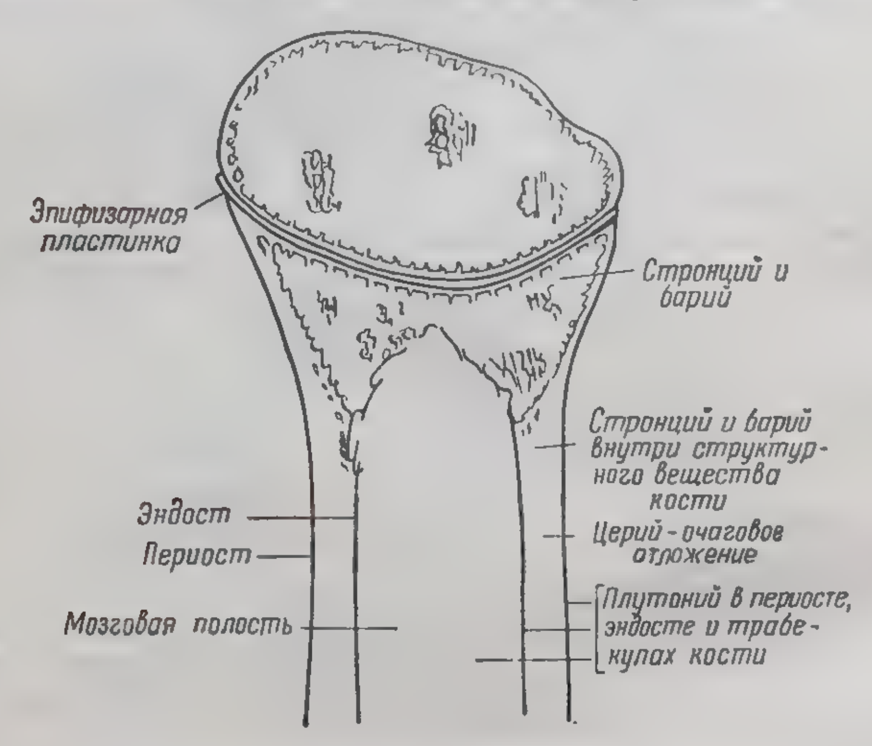


Рис. XI.105. Отложение химических элементов в растущей кости грызунов

XI.107. При одинаковых размерах радиоактивных частиц и одинаковой их растворимости радиоактивный материал легче проникает в кровь через органы дыхания, чем через пищеварительный тракт. Это обстоятельство может быть объяснено различием механизма проникания радиоактивных материалов в кровь через легкие и через пищеварительный тракт. Однако количество радиоактивного материала, попадающего в организм в результате вдыхания зараженного продуктами ядерного распада воздуха, по-видимому, оказывается относительно малым.

XI.108. Причина этого заключается в том, что нос может отфильтровывать почти все частицы диаметром более 10 *мк* (0,001 *см*) и около 95% частиц диаметром свыше 5 *мк* (0,0005 *см*). Вместе с тем большинство частиц, заражающих внешнюю среду в течение критического периода (периода наивысшей активности), т. е. в первые 24 часа после взрыва, будут иметь диаметр значительно больше 10 *мк* (см. § IX.125 и далее). Поэтому только небольшая доля находящихся в воздухе радиоактивных материалов будет попадать

в легкие. При проникании частиц из альвеол в кровяное русло оптимальный их размер составляет 5 *мк*. Таким образом, вероятность проникания в кровь радиоактивных веществ в результате вдыхания продуктов ядерного распада является довольно низкой.

XI.109. Абсорбция радиоактивных элементов через кишечный тракт в значительной мере зависит от их растворимости. Радиоактивные продукты ядерного распада, такие, как уран и плутоний, встречаются в основном в форме окисей, многие из которых мало растворимы в жидкостях организма. Однако окиси стронция и бария растворимы, благодаря чему они легко могут проникать в кровь и далее в кости. Йод в основном также находится в растворимой форме. Поэтому он быстро попадает в кровь и затем концентрируется в щитовидной железе.

XI.110. Более важным фактором, чем тенденция отдельных элементов к прониканию в чувствительные к радиоактивности органы, определяющим в основном опасность данного радиоактивного изотопа, является общая биологическая доза, излучаемая им в период пребывания в организме (или чувствительном органе). Наиболее важными показателями при определении величины этой дозы являются масса и период полураспада (см. § I.49) радиоизотопа, природа и энергия его излучений и время пребывания в организме. Это время зависит от двух факторов: обычного периода полураспада изотопа и так называемого **биологического периода полувыведения.** Последний представляет собой время, необходимое для того, чтобы количество определенного элемента, находящегося в организме, уменьшилось наполовину в результате естественных (биологических) процессов выделения. Комбинация периода полураспада и биологического периода полувыведения изотопа дает так называемый **период половинной эффективности,** который представляет собой время, необходимое для того, чтобы поражающее действие находящегося в организме изотопа понизилось наполовину в результате как радиоактивного распада, так и естественного выведения. В большинстве случаев период половинной эффективности изотопа для организма в целом совпадает с таковым для специфической ткани (или органа), в которой этот изотоп имеет тенденцию концентрироваться.

XI.111. Наибольшую потенциальную опасность при попадании в организм представляют изотопы с коротким периодом полураспада и относительно длительным периодом биологического полувыведения. Изотоп с коротким периодом полураспада будет давать более интенсивное излучение, чем такая же масса другого изотопа даже того же самого элемента, но имеющего более длительный период полураспада. Длительный биологический период полувыведения означает, что радиоактивный материал будет медленно выделяться из организма. Так, например, обычный йод имеет биологический период полувыведения, равный примерно 180 дням, так как он быстро поглощается щитовидной железой и медленно освобож-

дается из ее ткани. Радиоактивный изотоп йода — йод-131 — имеет период полураспада только 8 дней. Следовательно, если достаточное количество этого изотопа поступит в кровяное русло, может возникнуть серьезное поражение щитовидной железы. Следует отметить, что, кроме поражающего действия, проявляющегося немедленно, радиоактивный материал, даже если он обладает коротким периодом половинной эффективности, может вызывать поражения, которые проявятся только по истечении некоторого времени.

XI.112. Опасные радиоактивные изотопы, содержащиеся в продуктах ядерного распада, кроме радиоактивного йода, делятся на две группы. В первую и имеющую бо́льшее значение группу входят стронций-89, стронций-90 и барий-140. Ко второй группе относятся редкоземельные элементы, в частности церий-144 и химически подобный ему иттрий-91. Как указывалось выше, эти элементы легко отлагаются в костях, где излучаемые ими бета-частицы и гамма-лучи могут вызвать повреждения кроветворных тканей и образование опухолей.

XI.113. Потенциально опасным изотопом, присутствующим в продуктах ядерного распада, является также плутоний-239, излучающий альфа-частицы. Плутоний-239 имеет длительный период полураспада (24 000 лет), а также длительный биологический период полувыведения (более 100 лет). Отсюда следует, что если этот изотоп отложился в организме — в основном на определенных поверхностях кости (рис. XI.105),— его количество и активность снижаются очень медленно. Несмотря на короткий пробег в тканях, длительное воздействие альфа-частиц может вызвать значительное поражение. Как известно, радий, который в этом отношении очень схож с плутонием, действуя в достаточных количествах, вызывает некроз и костные опухоли, а также анемию, приводящую к смерти.

XI.114. Стронций, барий и плутоний, кроме концентрации в костной ткани, кумулируются в некоторых количествах также в печени и селезенке. Изотопы редкоземельных элементов тоже отлагаются в печени и в меньшей степени в селезенке. Однако многие радиоактивные изотопы из печени легко выделяются. Интересно отметить, что почки страдают от радиации мало, несмотря на то, что через них проходят в процессе выделения большие количества радиоактивного материала. Уран вызывает поражение почек, но скорее как химический яд, а не как радиоактивный элемент.

Опасность попадания в организм продуктов ядерного распада

XI.115. После взрывов атомных бомб в Японии количество выпавших продуктов ядерного распада было весьма незначительным, что не позволило получить какие-либо данные о проникании этих продуктов внутрь организма и воздействии их на ткани. Однако после случая заражения радиоактивными веществами жителей Маршалловых островов, имевшего место в марте 1954 г., были полу-

чены данные, представлявшие значительный интерес. Так как жители островов не имели представления об опасности, связанной с выпадением продуктов ядерного распада, то многие из них в течение двух или более дней ели зараженную пищу и пили зараженную воду из открытых водоисточников.

XI.116. Радиоактивные вещества проникали в организм главным образом через желудочно-кишечный тракт и в меньшей мере через органы дыхания, так как из воздуха они оседали относительно быстро, а зараженные пища, вода и домашняя утварь использовались длительное время. Это было подтверждено также в результате обследования животных и птиц (в частности, свиней и кур). Многие животные и птицы были вскрыты вскоре после взрыва. При этом их желудочно-кишечный тракт и печень имели бо́льшую радиоактивность, чем легкие.

XI.117. Определяя при помощи радиохимического анализа мочи количество радиоактивных веществ, выделявшихся у жителей Маршалловых островов, можно было исчислять примерное количество этих веществ, отложившихся в организме. Таким путем было установлено, что вначале главную опасность для организма представлял йод-131, действие которого, однако, быстро прекращалось благодаря относительно короткому периоду полураспада (8 дней). Примерно то же самое относится и к барию-140 (период полураспада около 13 суток). Действие изотопов стронция было более длительным. Они имеют не только более продолжительный период полураспада, но и относительно длительный биологический период полувыведения.

XI.118. Было установлено, что в организме задерживаются в значительных количествах только йод, стронций, барий и редкоземельные элементы. Все другие продукты ядерного распада не имеют большого значения ввиду краткости периода половинной эффективности, слабой растворимости их окислов или относительно бо́льших размеров выпадающих частиц.

XI.119. В организме наиболее сильно зараженных жителей Маршалловых островов не было отмечено большого отложения радиоактивных веществ; при этом их количество относительно быстро снизилось через два или три месяца. Активность изотопов стронция снижалась несколько медленнее, чем активность других радиоактивных изотопов благодаря более длительным периодам их полураспада и биологического полувыведения, а также тенденции отлагаться в костях. Несмотря на это, даже стронций не мог рассматриваться во всех случаях обследования как опасный источник внутреннего излучения. Через 6 месяцев после взрыва моча большей части пострадавших содержала только едва поддающиеся определению количества радиоактивного материала.

XI.120. Несмотря на то, что на Маршалловых островах условия жизни населения благоприятствовали максимальному заражению запасов пищи и воды, а сами жители не принимали каких-либо мер

для своей защиты, количество пораженных в результате попадания радиоактивных веществ внутрь организма было невелико. Нет никаких сомнений в том, что опасность поражения радиоактивными веществами (особенно с коротким периодом полураспада) в результате попадания их в организм значительно меньше по сравнению с опасностью поражения от воздействия внешнего излучения. Если принимать разумные меры защиты, как это будет описано в главе XII, то возможность таких поражений, по всей вероятности, может быть значительно снижена.

Опасность попадания в организм стронция-90

XI.121. Кроме рассмотренного выше длительного воздействия радиоактивного материала, попадающего в организм с воздухом, пищей и водой и соответственно из него выделяющегося, о чем пока что известно очень мало, имеются некоторые соображения, связанные с действием долгоживущего стронция-90. По-видимому, ввиду того, что один из предшественников стронция-90, а именно: криптон-90, является газом, начальные продукты деления, особенно те, которые быстро выпадают, содержат малое количество изотопа стронция. Во всяком случае, если судить по опыту, полученному на Маршалловых островах, вероятность того, что стронций будет попадать в организм и отлагаться в нем в результате вдыхания или введения в желудочно-кишечный тракт частичек радиоактивного выпадения, невелика. Однако более важным является возможность попадания в организм стронция-90 с различной пищей в течение длительного периода после взрыва.

XI.122. Как отмечено в главе X, стронций-90 и другие продукты ядерного распада, которые в виде очень малых частичек выбрасываются при взрыве в стратосферу, в конце концов оседают на землю. Стронций затем может попасть в организм человека главным образом с молоком и молочными продуктами. Ввиду медленного выделения из организма стронция-90, период полураспада которого составляет примерно 28 лет, он будет накапливаться в костях. При значительном накоплении его в организме могут возникнуть поражения, подобные тем, которые вызываются большими количествами радия и плутония (см. § XI.113).

ГЕНЕТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОЙ РАДИАЦИИ

Спонтанные и наведенные мутации

XI.123. Генетическое воздействие излучения носит долговременный характер; результаты его не проявляются у подвергшихся облучению немедленно, однако у будущих поколений могут быть заметные последствия. Изменения генетического аппарата под воздействием ядерного излучения отличаются от большинства других изменений тем, что они, по-видимому, кумулируются и не зависят в сильной степени от дозы однократного облучения. Другими сло-

вами, характер генетических изменений в результате облучения зависит от суммарной дозы радиации, полученной данным индивидуумом, а не от того, является ли облучение кратковременным или долговременным. Таким образом, поскольку это касается генетических изменений, не имеет большого значения, является ли облучение хроническим или острым.

XI.124. Механизм наследственности, который в основном одинаков у всех размножающихся половым путем животных, включая человека, схематически представляется в следующем виде: ядра всех делящихся клеток содержат определенное число нитевидных образований, называемых **хромосомами**, которые видны под микроскопом. Считается, что эти хромосомы дифференцируются по всей длине на тысячи отличающихся друг от друга единиц, называемых «генами». Хромосомы и гены существуют в любой клетке организма, но с точки зрения генетики (или наследственности) значение имеют только те из них, которые находятся в половых клетках воспроизводящих органов.

XI.125. Клетки человеческого организма нормально содержат 48 хромосом, образующих два подобных (но не идентичных) набора по 24 хромосомы в каждом [1]. Один из этих наборов наследуется от матери, из клетки яйца, продуцируемого яичниками, а другой — от отца, из клетки спермы, продуцируемой яичками. У индивидуума, развивающегося в результате слияния половых клеток, хромосомы и гены, как правило, дублируются без изменений.

XI.126. Отклонение от нормального процесса передачи наследственных признаков, когда вместо полного дублирования хромосом один или большее число генов претерпевают изменение, встречается в редких случаях. Это изменение, называемое **мутацией**, приобретает постоянный характер, так как мутантный ген воспроизводится в своей видоизмененной форме. Если мутация произошла в обычной клетке организма, это может оказать некоторое воздействие на данного индивидуума, однако связанные с мутацией изменения по наследству передаваться не будут. Если же мутация произошла в половой клетке любого из родителей, последующие поколения приобретут новые характерные признаки. Мутации, происходящие естественным путем, без каких-либо явных причин или вмешательства человека, называются **спонтанными мутациями.**

XI.127. Непосредственный интерес представляет тот факт, что частота мутаций может быть повышена различными искусственными путями, одним из которых является воздействие радиации на половые железы. Действие излучения на воспроизводительные органы изучалось на различных насекомых и млекопитающих, причем оно, несомненно, имеет значение и для человека. Мутация генов, вызванная облучением, качественно не отличается от спонтан-

[1] Согласно новейшим данным, количества хромосом могут составлять соответственно 46 и 23.

ной мутации; практически их невозможно различить. Однако в связи с воздействием излучения повышается частота мутаций.

XI.128. Все гены обладают способностью быть или **доминантными** (господствующими) или **рецессивными** (подавленными). Если ген является доминантным, то соответствующий признак, носителем которого он является, будет воспроизводиться в потомстве, даже при отсутствии этого гена в половой клетке одного из родителей. С другой стороны, для появления характерного рецессивного признака в следующем поколении необходимо, чтобы соответствующие рецессивные гены присутствовали в половых клетках обоих родителей. Таким образом, рецессивный ген может быть скрытым у ряда поколений, пока не возникнут условия для объединения половых клеток обоих родителей, каждая из которых будет содержать этот специфический ген.

XI.129. Новые мутации, возникающие спонтанно или под действием радиации, как правило, являются рецессивными. Несмотря на это, мутантный ген, по-видимому, редко бывает полностью рецессивным, и некоторые из носимых им признаков могут проявиться в следующем поколении, даже если этот специфический ген наследуется только от одного из родителей. Далее, в большинстве случаев новые признаки, возникающие в связи с мутацией, являются отрицательными. Несомненно также, что некоторые изменения, связанные с мутацией, имеют положительный характер, однако они проявляются только в медленном процессе биологической эволюции.

XI.130. Отрицательные признаки, возникающие в результате мутации, могут быть мало заметными, выражаясь, например, в повышенной подверженности заболеваниям или в сокращении на несколько месяцев продолжительности жизни, и серьезными, приводящими к гибели плода в утробном состоянии или к рождению неспособного к размножению потомства. Таким образом, индивидуумы, несущие в себе мутантные гены, ставятся в невыгодное положение относительно остальной части населения, в особенности в том отношении, что им суждено иметь меньшее количество детей или умереть раньше других людей. Отсюда очевидно, что эти гены будут иметь тенденцию устраняться из населения. При этом ген, несущий более отрицательные признаки, будет устранен быстро, так как только небольшое количество индивидуумов, несущих такие гены, доживет до периода размножения. С другой стороны, мутантный ген, имеющий менее отрицательные признаки, может удерживаться и причинять (хотя и меньший) вред значительному числу индивидуумов гораздо более продолжительное время.

Мутация и доза излучения

XI.131. Эксперименты с различными животными показали, что частота мутаций в результате облучения приблизительно пропорциональна суммарной дозе радиации, поглощенной воспроизводи-

тельными органами родителей от начала их развития до момента зачатия потомства. Отсюда видно, что любое количество излучения, как бы оно мало ни было, ведет к увеличению частоты мутаций. Величина отдельной дозы облучения или длительность воздействия радиации в данном случае имеет небольшое значение, поскольку решающим моментом является суммарная доза облучения, воспринятая воспроизводительными органами. Однако необходимо подчеркнуть, что степень вредности той или иной мутации не будет обязательно пропорциональна этой суммарной дозе облучения. При большой дозе мутации будут такими же по своему характеру, как и при малой дозе облучения. Однако их частота в первом случае значительно возрастет.

XI.132. При рассмотрении возможных генетических последствий применения ядерного оружия необходимо учитывать, во-первых, последствия воздействия первичной и остаточной радиации, проявляющейся после взрыва, и, во-вторых, результат медленной аккумуляции стронция-90 (а также других продуктов ядерного распада) в организме. Из этих двух аспектов первый, безусловно, является более важным. По расчетным данным, для увеличения количества мутаций среди населения вдвое необходимо, чтобы воспроизводительные органы каждого индивидуума дополнительно к естественной радиоактивности (см. § IX.41) подверглись бы облучению в дозе от 30 до 80 *р* до момента зачатия потомства. Пропорционально бóльшая доза, приходящаяся на меньшую группу населения, оказала бы примерно такое же воздействие на частоту мутаций и их конечные последствия.

XI.133. С другой стороны, можно ожидать, что генетические последствия действия стронция-90 будут весьма малыми. Этот изотоп имеет тенденцию аккумулироваться в костях, и так как он испускает бета-частицы, а не гамма-лучи, то излучение, достигающее воспроизводительные органы, будет иметь малое поражающее действие. В равной степени это будет относиться и к другим продуктам ядерного распада, которые могут отлагаться в костной или прочих тканях.

ПАТОЛОГИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОРАЖЕНИЙ[1]

Чувствительность тканей к излучению

XI.134. Приведенные выше данные касались в основном общего поражающего действия радиации и общих симптомов лучевых поражений. Однако даже изменения в крови косвенно связаны с действием ядерного излучения на костный мозг и лимфатическую ткань. Поэтому необходимо вкратце рассмотреть патологические изменения, вызываемые излучением в отдельных органах и тканях.

[1] Этот раздел при чтении данной главы может быть опущен.

XI.135. Поражающее действие излучений, несомненно, связано с изменениями в отдельных клетках. Характер этих изменений, выявленных к настоящему времени, изложен в § XI.45. Следует отметить, что различные виды клеток реагируют на облучение поразному. Так, быстро размножающиеся и регенерирующие клетки являются более чувствительными к радиации, чем клетки, находящиеся в состоянии покоя. Одним из наиболее сильно выраженных последствий облучения является резкое снижение или даже полное прекращение деления клеток (митозов), в органах, которые нормально находятся в состоянии непрерывной регенерации.

XI.136. По степени чувствительности к радиации различные ткани можно расположить в следующем порядке: лимфоидная ткань и костный мозг, эпителиальная ткань (яички и яичники, слюнные железы, кожа и слизистые оболочки), эндотелиальные клетки кровеносных сосудов и брюшины, соединительная ткань, костная ткань, мышечная ткань и, наконец, дифференцированные (специализированные) нервные клетки. Следует отметить, что некоторые нервные клетки с малой дифференциацией, особенно нервные клетки эмбрионов, довольно чувствительны к излучению.

Лимфоидная ткань

XI.137. Лимфоидная ткань — это ткань, характерная для лимфатических желез, миндалин, селезенки и некоторых участков внутренней оболочки кишок. Так называемые лимфатические железы, расположенные в различных частях организма, представляют собой сеть из соединительной ткани, в ячейках которой находятся лимфоидные клетки. Достигнув зрелого состояния, эти клетки уносятся лимфатической жидкостью, протекающей через железы, и становятся лимфоцитами, являющимися одним из видов белых кровяных клеток (см. § XI.77). Как указано в предыдущем параграфе, лимфоидная ткань наиболее чувствительна к радиоактивному излучению.

XI.138. Под воздействием излучения лимфоидные клетки приобретают патологические изменения или гибнут. Микроскопическим исследованием облученных клеток установлены характерные отклонения от нормального состояния. Дегенерация лимфоидной ткани, включая образование атипичных клеток, представляла собой характерное явление для жертв атомной бомбардировки в Японии. В результате нарушения процесса образования клеток происходит снижение в крови числа лимфоцитов, которые, как и вырабатывающая их лимфоидная ткань, могут также повреждаться от действия излучения. Если существенного снижения количества лимфоцитов в крови не наблюдается в первые 72 часа после облучения, можно считать, что доза облучения была слишком малой и не имела поражающего действия.

XI.139. Лимфоидная ткань, поврежденная излучением, имеет тенденцию к отеканию, т. е. набуханию благодаря накоплению серозной жидкости. У пострадавших от атомного нападения в Японии очень часто отмечалось истощение лимфатических желез, миндалин и лимфоидных включений во внутренних органах.

Костный мозг

XI.140. Поскольку бо́льшая часть клеток, составляющих кровь, кроме лимфоцитов, вырабатывается в костном мозгу, высокая чувствительность ткани костного мозга к радиации имеет важное значение. При нормальных условиях зрелые кровяные клетки покидают костный мозг, попадают в кровяное русло и циркулируют в крови определенный период, пока не будут разрушены в результате естественных процессов. Чем короче срок жизни специфического типа кровяных клеток, тем быстрее уменьшается их количество в крови в результате облучения организма. Красные кровяные клетки, имеющие самый продолжительный срок жизни, меньше всего снижают свою численность после облучения (см. § XI.80).

XI.141. В костном мозгу вскоре после облучения появляются резкие изменения. Кроветворная ткань прекращает свою деятельность. В некоторых случаях при тяжелых поражениях в Японии было установлено, что вместо гранулоцитов вырабатываются элементы, напоминающие плазматические клетки. Для многих лиц, умерших от лучевой болезни через три-четыре месяца после облучения, была характерна сильная атрофия костного мозга. В некоторых случаях отмечались факты, указывающие на наличие регенеративных процессов. Иногда нормальный костный мозг замещался желатинистым отложением.

Органы размножения

XI.142. При патологоанатомическом исследовании мужчин, умерших в результате воздействия радиации, почти во всех случаях обнаруживались глубокие изменения в яичках. Даже при смерти на 14-й день после облучения, когда крупные изменения еще не успевали развиться, микроскопическими исследованиями обнаруживались дегенеративные процессы в тех слоях эпителия, из которых развиваются сперматозоиды. В клетках, в частности, отсутствовали нормальные процессы деления.

XI.143. Хотя яичники также весьма чувствительны к излучению, очевидные изменения в этих органах у японских женщин, по-видимому, были менее резкими, чем изменения в яичках у мужчин. За исключением кровоизлияний, характерных для всех подвергшихся облучению, значительных изменений макро- или микроскопического характера не отмечалось. У женщин, оставшихся в живых, часто нарушался процесс овуляции (выход яйцеклеток) и свя-

занный с ним менструальный цикл. Наблюдались временное прекращение менструаций, учащение случаев спонтанных абортов и преждевременных родов, а также увеличение смертности среди беременных женщин. Перечисленные явления варьировали по тяжести пропорционально расстоянию от эпицентра взрыва, на котором находились пострадавшие.

XI.144. В связи с изменениями воспроизводительных органов под действием радиации следует отметить, что доза, необходимая для стерилизации человека, находится в пределах от 450 до 600 *р*. Эта доза при общем облучении в большинстве случаев оказалась бы смертельной. Временная стерильность, как видно из данных, полученных в Японии, может наблюдаться и при меньших дозах облучения. В некоторых случаях функция воспроизводительных органов не восстанавливалась, что, возможно, было связано не только с облучением, но и с другими причинами, например болезнью или недостаточным питанием. Многие из подвергшихся воздействию существенных доз радиации, как отмечалось, впоследствии имели, по-видимому, вполне нормальных детей.

Выпадение волос

XI.145. Эпиляция (выпадение волос) главным образом на голове была обычным явлением для японцев, оставшихся в живых по истечении двух недель с момента взрыва. Максимальное выпадение волос отмечалось между 13-м и 14-м днями как у мужчин, так и женщин. Волосы внезапно начинали выпадать пучками при расчесывании или даже самопроизвольно. Это явление продолжалось в течение одной-двух недель и затем прекращалось.

XI.146. Во многих случаях эпиляция напоминала обычное облысение, начинаясь со лба и переходя на теменную и затылочную части головы. Волосы из бровей и бороды и в особенности ресницы выпадали в значительно меньшей степени. Среди небольшой группы японцев (которая, может быть, и не является типичной) 69% потеряли волосы на голове, 12% — под мышками, 10% — на лобковой области, 6% — из бровей и 3% — из бороды. При тяжелых поражениях рост волос возобновлялся через несколько месяцев, и ни в одном случае эпиляция не носила необратимого характера.

Желудочно-кишечный тракт

XI.147. Слизистая оболочка желудочно-кишечного тракта японцев, подвергшихся воздействию излучения, находилась в числе первых тканей, в которых были обнаружены значительные изменения. Даже до появления кровоизлияния и связанных с ним явлений отмечалось набухание, изменение цвета и утолщение слизистой оболочки слепой кишки и толстых кишок. Особенно силь-

ные поражения имели участки лимфоидной ткани. У многих японцев наблюдалось набухание и поверхностное, а затем более глубокое изъязвление слизистой оболочки кишечного тракта. Образовавшиеся язвы покрывались слизистыми пленками, а слизистая оболочка кишечника в целом несколько напоминала таковую при бактериальной дизентерии.

XI.148. Вскрытие после смерти обычно обнаруживало у умерших спустя 3—4 недели после облучения воспаление кишок и в отдельных случаях желудка. На ранних стадиях поражались только тонкие кишки, но позднее патологический процесс отмечался и в толстом кишечнике, на всем его протяжении. Утолщение стенок кишок и образование слизистых пленок напоминало аналогичные процессы при бактериальной дизентерии. В основе этих изменений, по-видимому, лежит некроз ткани, являющийся результатом облучения, понижения местной сопротивляемости и ухудшения кровоснабжения. Под микроскопом особенно заметными были изменения, которые выражались в набухании тканевых клеток и отсутствии в пораженных тканях инфильтрации лейкоцитов.

Кровотечения и инфекция

XI.149. В тканях мочевого тракта, мышцах и всех других мягких тканях отмечались кровоизлияния размерами от булавочного укола до нескольких сантиметров в диаметре. Эти кровоизлияния заслуживали внимания, поскольку степень их интенсивности является показателем характера и тяжести поражений. Если кровоизлияния возникают в таких важных органах, как сердце, легкие или мозг, их последствия могут быть гибельными. Влияние кровоизлияния на функцию органа зависит от размеров кровоизлияния и его дислокации в тканях данного органа. Некоторые кровоизлияния обнаруживаются в результате обследования пострадавшего; так, например, можно выявить кровоизлияния в полости рта, носа и горла, в глазу или в мочевом тракте. Значительные кровоизлияния могут возникнуть в мочевых канальцах почек, в мочеточниках и в мочевом пузыре.

XI.150. Кровоизлияния, нарушающие целостность зараженного бактериями поверхностного слоя эпителия, могут привести к ряду других последствий. Потерявшие жизнеспособность ткани не обладают сопротивляемостью к воздействию микробов и могут стать идеальной средой для их размножения. В этом случае большой вред приносят даже те микроорганизмы, которые в обычных условиях опасности не представляют и, как правило, обнаруживаются в пищеварительном тракте и на коже. Микробная инвазия у пораженных излучением способна привести к серьезному местному разрушению ткани или вызвать общее заражение в результате попадания микробов в кровяное русло. Вследствие малой сопротивляемости микробам на любой части тела могут образоваться фурун-

кулы и нарывы. Однако эти поражения имеют локальный характер и поэтому менее опасны.

XI.151. Изменения в глотке больного лучевой болезнью могут иметь сходство с поражениями, характерными для отравления химическими ядами, действующими преимущественно на костный мозг и ретикуло-эндотелиальную систему[1]. В других случаях эти изменения могут напоминать таковые при некоторых заболеваниях крови, связанных с отсутствием в циркулирующей крови гранулоцитов (агранулоцитоз). При лучевой болезни процесс изъязвления иногда распространяется на язык, десны, слизистую оболочку полости рта, губы и даже на кожу лица. Изъязвления могут появляться независимо от наличия кровоизлияния. Такие же изменения могут возникнуть также по ходу всего желудочно-кишечного тракта. В легких может развиваться пневмония, которая отличается от других видов пневмоний тем, что при ней почти полностью отсутствует инфильтрация пораженных тканей легкого белыми кровяными клетками.

---

[1] Ретикуло-эндотелиальная система играет в организме защитную роль, освобождая его от бактерий и ядовитых веществ и участвуя в выработке иммунитета. (*Прим. ред.*)

ГЛАВА XII

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРОТИВОАТОМНОЙ ЗАЩИТЕ

ВВЕДЕНИЕ

Виды противоатомной защиты

XII.1. В предыдущих главах настоящей книги было рассмотрено поражающее действие ядерного взрыва, которое включает в себя разрушение сооружений и поражение людей, вызываемые воздействием распространяющейся в воздухе, грунте или воде ударной волны, а также воздействием светового излучения, начальной и остаточной радиации. В этой главе будет сделана попытка сформулировать ряд положений, которые следует учитывать при планировании мероприятий по противоатомной защите. Проблема противоатомной защиты является сложной, так как она охватывает не только собственно защиту от поражающих факторов ядерного взрыва, но также методы и эффективность системы оповещения и мероприятия экономического, социального и психологического характера.

XII.2. Выше была дана достаточно подробная характеристика поражающих факторов ядерного взрыва. Однако при планировании мероприятий по противоатомной защите возникает столь много непредвиденных обстоятельств, что не представляется возможным сделать точный анализ какой-либо конкретной обстановки. Наиболее очевидными переменными величинами являются точка прицеливания для поражения данного объекта, тротиловый эквивалент ядерного заряда, высота и тип ядерного взрыва, неточности бомбометания, топографические особенности района взрыва, а также метеорологические условия.

XII.3. Вообще существуют два принципа противоатомной защиты, которые можно кратко сформулировать при помощи двух слов: расстояние и укрытие. Другими словами, необходимо либо оказаться в зоне недосягаемости воздействия поражающих факторов ядерного взрыва, либо предпринять меры защиты, оставаясь в пределах радиуса действия этих поражающих факторов. Первый принцип, т. е. принцип расстояния, определяет принятое в системе гражданской обороны понятие эвакуации населения из районов

вероятного атомного нападения[1]. При любом рассмотрении вопроса об эвакуации данная книга может служить лишь в качестве пособия, определяющего значение безопасного расстояния от центра взрыва для эвакуируемого населения. Не следует забывать и о том, что проблема эвакуации чрезвычайно затрудняется в случае выпадения радиоактивных веществ из радиоактивного облака, которое создает опасность поражения людей на большом расстоянии от зоны непосредственных разрушений. Поэтому в этой главе будут рассмотрены лишь некоторые вопросы, входящие в понятие «укрытие», которое равнозначно понятиям «убежище» или «защитное сооружение».

XII.4. Сама по себе проблема защиты посредством сооружения соответствующих укрытий является довольно сложной. Однако она не настолько сложна, как это может казаться вначале при рассмотрении многих поражающих факторов ядерного взрыва, перечисленных в § XII.1. Во многих случаях мероприятия, направленные на защиту от воздействия ударной волны и пожаров, могут содействовать также уменьшению опасности поражения людей световым излучением и ядерной радиацией.

XII.5. Для предохранения людей от ожогов, возникающих в результате воздействия светового излучения, необходимо в первую очередь обеспечить защиту от непосредственного воздействия этого излучения и, кроме того, не допускать скопления легко воспламеняющихся предметов и окрашенных в темный цвет материалов, особенно вблизи окон. Единственным известным средством защиты от гамма-излучений и потока нейтронов, входящих в состав ядерной радиации, является устройство сооружений с достаточно толстым слоем защитного материала, который смог бы предохранить человека от воздействия поражающих факторов ядерного взрыва как в зоне самого взрыва, так и в зоне возможного выпадения радиоактивных частиц из радиоактивного облака. Использование бетона в качестве строительного материала позволит уменьшить не только разрушающее действие ударной волны воздушного и наземного взрывов, но и в значительной степени снизит опасность поражения ядерным излучением. При этом поверх бетона рекомендуется насыпать дополнительное земляное покрытие.

XII.6. С точки зрения механических разрушений проблема сооружения зданий, способных противостоять воздействию ударной волны, образующейся при ядерном взрыве, несколько отличается от такой же проблемы, возникающей при взрыве обычного фугасного заряда. Взрыв бомбы, снаряженной тротилом, обычно вызывает такое разрушение здания, при котором оно распадается на части, а при ядерном взрыве сооружение рушится или смещается

[1] Проблема эвакуации рассматривается в следующих изданиях Федеральной администрации гражданской обороны: TM-27-1 «Procedure for Evacuation Traffic Movement Studies»; TB-27-1 «Evacuation of Civil Populations in Civil Defense Emergencies»; TV-27-2 «Evacuation Check List».

как единое целое. По сравнению со взрывом обычного заряда при ядерном взрыве освобождается во много раз большее количество энергии, которое обусловливает больший период времени воздействия ударной волны, вследствие чего характер воздействия ударной волны ядерного взрыва значительно отличается от характера воздействия ударной волны при взрыве обычного заряда (см. гл. III).

XII.7. Другим важным отличием последствий ядерного взрыва

Рис. XII.7. Часть города Нагасаки в районе эпицентра взрыва перед атомным нападением и после него (расстояние между концентрическими кругами равно 305 *м*)

от последствий обычного взрыва является большая площадь разрушений, наблюдаемая в первом случае. Даже бомбы с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*, такие, например, какие были взорваны над Японией, могут опустошить районы, имеющие площадь в несколько квадратных километров (рис. XII.7). Взрыв ядерного заряда с тротиловым эквивалентом в несколько миллионов тонн может разрушить район площадью до 258 *км*² и более.

Общие положения, касающиеся мероприятий по противоатомной защите

XII.8. Наиболее эффективным, но не обязательно наиболее доступным на практике методом уменьшения опасности поражения ядерным взрывом является рассредоточение объектов и постройка подземных сооружений. Эти мероприятия не рассматриваются в данной книге, однако здесь будут отмечены некоторые другие меры, которые могут быть приняты с целью уменьшения числа человеческих жертв и материального ущерба, вызываемых ядерным взрывом. Главная цель рассматриваемых в данной книге положений состоит в том, чтобы дать некоторые основные сведения, необходимые для планирования и осуществления защитных мероприятий. Разработка этих мероприятий, а также вопросы, связанные с распространением информации о них, являются функцией Федеральной администрации гражданской обороны.

XII.9. Наилучшие возможности для осуществления защитных мероприятий ценой минимальных затрат предоставляются при проектировании новых сооружений. Однако во многих случаях в конструкцию существующих сооружений могут быть внесены такие изменения, которые повысили бы их устойчивость и огнестойкость и обеспечивали бы лучшую защиту людей и материальных ценностей от ядерного излучения. Например, степень разрушений от воздействия ударной волны можно уменьшить путем усиления сооружения; такое усиление в первую очередь должно быть рассчитано на противодействие боковым (горизонтальным) нагрузкам. Опасность возникновения пожаров может быть уменьшена, если принять меры для предотвращения скапливания снаружи неукрытых воспламеняющихся материалов. И, наконец, некоторую защиту от гамма-излучения и потока нейтронов может обеспечить увеличение толщины стен здания.

XII.10. В последующих разделах этой главы будет дан ряд рекомендаций в связи с проектированием новых и усовершенствованием уже существующих зданий. Однако эти рекомендации будут относиться главным образом к многоэтажным зданиям, предназначенным для коммерческих, промышленных или административных целей. Что же касается обычных жилых домов, то для усиления всех частей, расположенных над фундаментом таких зданий, едва ли что можно сделать, не производя неоправданных расходов. При

небольших затратах можно, однако, существенно усилить стены подвалов, опорные элементы балок надподвального перекрытия, а также самого перекрытия, а в самих подвальных помещениях можно предусмотреть оборудование убежищ.

XII.11. Ударная волна с максимальным избыточным давлением порядка 0,14 *кг/см*² причинит значительные повреждения. Постройка дома, рассчитанного на избыточное давление более 0,35 *кг/см*², потребует больших затрат; поэтому целесообразность строительства такого дома является сомнительной. Сооружения промышленного и стратегического значения можно строить с расчетом на их сопротивляемость избыточному давлению порядка 1,75 *кг/см*² или более лишь в том случае, если дополнительные затраты на эти цели являются оправданными.

XII.12. Перед тем как приступить к проектированию таких сооружений, необходимо задаться определенными условиями воздействия поражающих факторов, например величиной избыточного давления ударной волны и мощности дозы начальной радиации, от которых сооружение должно обеспечить защиту. Конечно, при выборе типа сооружения неизбежно будет допускаться определенный риск, так как при атомном нападении реальные условия, определяемые величиной тротилового эквивалента ядерного заряда и расстоянием от центра взрыва до сооружения, могут оказаться более тяжелыми по сравнению с условиями, принятыми для проектирования. Выход, пожалуй, состоит в том, чтобы строить настолько прочные сооружения, чтобы они могли выдержать избыточное давление ударной волны порядка 7 *кг/см*². Однако такая альтернатива вызывает необходимость осуществления ряда специальных мероприятий, характерных для подземного строительства. Эти мероприятия могут включать в себя полный переход на искусственное освещение, кондиционирование воздуха, использование независимой системы энергоснабжения и ряд других мер (см. § XII.52), обеспечивающих безопасное пребывание людей в подземных сооружениях.

XII.13. Для преобладающего большинства сооружений проект должен одновременно учитывать обеспечиваемую ими степень защиты от различных поражающих факторов ядерного взрыва, их оперативно-тактическое значение, а также сложность и стоимость их постройки. При выборе так называемых практических условий проектирования можно воспользоваться графиком, изображенным на рис. XII.13; на графике для различных значений тротилового эквивалента и расстояний от эпицентра взрыва указаны определенные величины максимального избыточного давления, скоростного напора и суммарной дозы начальной радиации (гамма-лучи и поток нейтронов). Количество световой энергии на графике соответствует ожогам второй степени и началу воспламенения легко возгораемого материала.

Необходимо отметить, что только самые прочные железобетон-

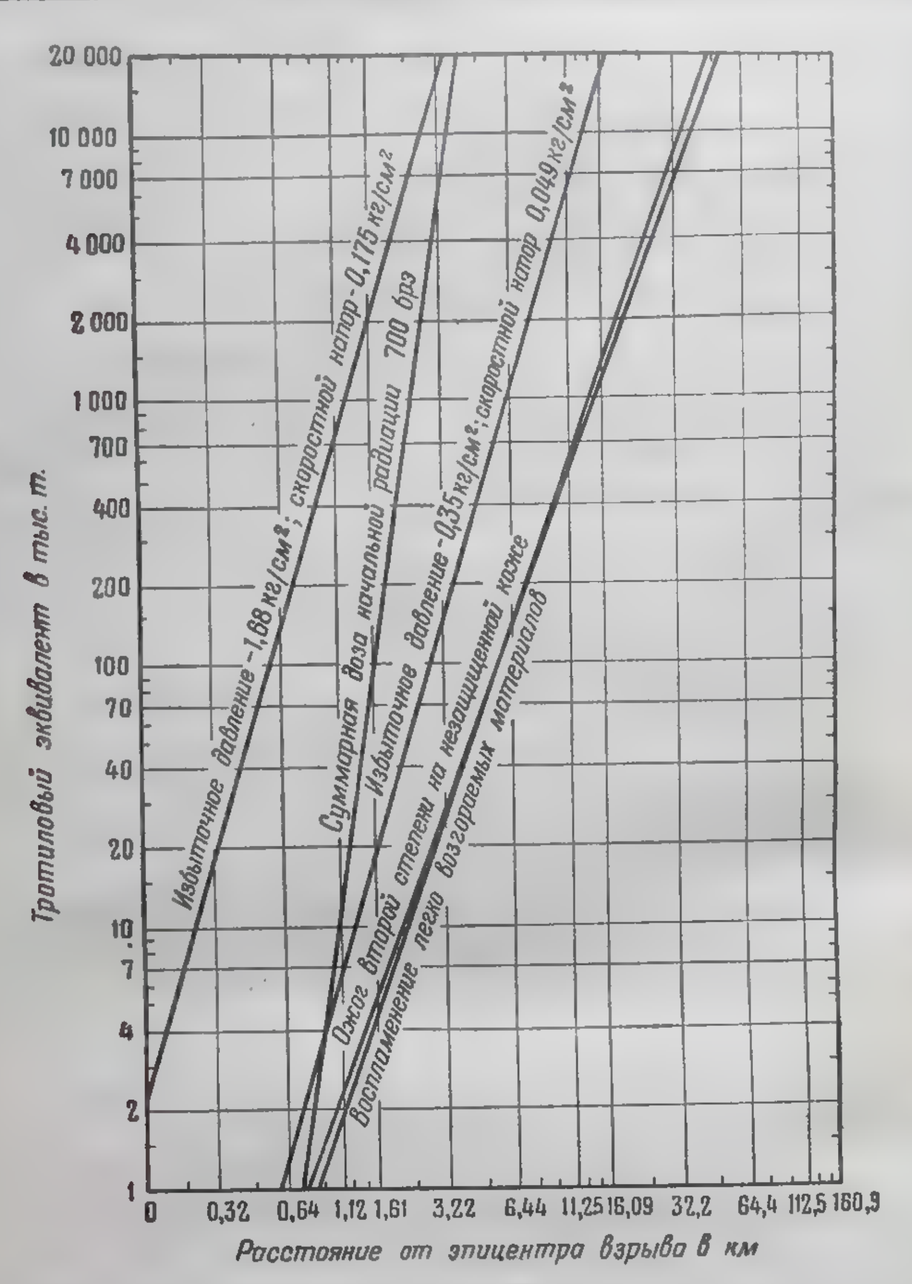


Рис. XII.13. Действие поражающих факторов воздушного ядерного взрыва для различных значений тротилового эквивалента и расстояний от эпицентра взрыва

ные здания смогут выдержать давление, равное 1,68 *кг/см²*; большинство же домов будет разрушено или сильно повреждено уже при избыточном давлении в 0,35 *кг/см²* (величины скоростного напора, указанные на данном графике, представляют собой значения горизонтальных составляющих для типичных воздушных взрывов). Дозы радиации, равные 700 биологическим рентген-эквивалентам (*брэ*), возможно, окажутся смертельными для большинства людей, подвергшихся такому облучению.

СООРУЖЕНИЯ С ВЫСОКОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ДЕЙСТВИЮ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Общие положения. Методы проектирования

XII.14. При проектировании взрывоустойчивого сооружения необходимо учитывать величину действующей на это сооружение динамической нагрузки. Как указывалось в предыдущих главах книги, эта динамическая нагрузка возникает внезапно; ее величина изменяется во времени и зависит от характеристик самой ударной волны, а также от формы, размеров и прочности различных частей сооружения. Методы определения реакции сооружения при действии на него динамической нагрузки технически отличаются от обычных методов, применяемых при определении реакции сооружения, возникающей от статических нагрузок (см. гл. VI).

XII.15. Вообще существуют три основных аспекта, отличающих метод проектирования взрывоустойчивых сооружений от метода проектирования сооружений, находящихся под воздействием статических нагрузок. Во-первых, важным фактором является масса, так как при смещении здания его масса оказывает влияние на величину ускорения. При всех прочих равных условиях более массивное сооружение лучше выдержит воздействие взрыва, чем менее массивное. Во-вторых, многие строительные материалы, в том числе сталь, бетон и даже древесина, проявляют повышенную прочность под воздействием нагрузок, возрастающих с большой скоростью, как это имеет место при воздействии ударной волны. Для быстро нарастающих нагрузок предел текучести материала может быть увеличен на 50% или более по сравнению с его величиной при нагрузках, нарастающих с малой скоростью. В-третьих, при проектировании взрывоустойчивых сооружений с использованием материалов, способных к упругим и пластическим деформациям, возможно, а по экономическим соображениям даже целесообразно допускать напряжения, лежащие за пределами упругости.

XII.16. Следует считать допустимым наличие в сооружении некоторой степени остаточной деформации, которая не выводит его из строя с точки зрения основного назначения сооружения. Хорошим примером сооружений, в которых возможен большой допуск остаточной деформации, являются здания промышленного типа со стальным каркасом. С другой стороны, эксплуатация зданий, используемых под учреждения, эксплуатация многоквартирных домов и прочих построек, имеющих шахты для лифтов, перегородки, двери, окна, а также различные скрытые коммуникации, может быть нарушена при значительно меньшей величине остаточных деформаций.

XII.17. При проектировании взрывоустойчивых сооружений необходимо в первую очередь задаться параметрами ударной волны, т. е. величиной максимального избыточного давления и скоростного

напора, а также характером их изменения во времени. Эти факторы зависят от мощности взрыва, вероятного расстояния от центра взрыва до сооружения, а также от высоты взрыва. Так как, возможно, ни одна из этих переменных величин не будет известна заранее, принятые предпосылки в отношении допустимой величины ударной нагрузки будут заключать в себе значительную долю неопределенности. Выбор величины ударной нагрузки при проектировании сооружения должен основываться на правильном учете соотношения между его стоимостью и степенью его важности.

XII.18. После того как будет выбрана величина ударной нагрузки, следует произвести динамический анализ проектируемого сооружения с целью определения его прочности и максимальной сопротивляемости, которые соответствуют предельной величине разрушающей нагрузки или определенному пределу пластической деформации. Этот предел будет определен на основе требований, вытекающих из назначения сооружения. Величина критической деформации может быть ограничена до такого предела, при котором еще не наступает разрушение сооружения, что обеспечивает защиту находящихся в нем людей и материальных ценностей. Одним из требований может явиться также возможность продолжения эксплуатации сооружения после взрыва с учетом обычных нагрузок. Следующим шагом в проектировании будет составление спецификации на отдельные элементы и узлы здания с целью обеспечения требуемых прочности и жесткости.

XII.19. Для точного предсказания поведения здания, в случае если оно будет подвергнуто воздействию нагрузок ударной волны, потребуется применение сложных методов проектирования и учета действия динамических нагрузок, не используемых в обычном строительном проектировании.

Строительные материалы

XII.20. При выборе строительных материалов необходимо иметь в виду, что энергия, поглощаемая сооружением в процессе пластической деформации, может в значительной мере способствовать сопротивляемости этого сооружения динамическим нагрузкам. Хрупкие материалы, в том числе стекло, чугун и неармированная каменная кладка, не могут выдержать напряжений, лежащих за пределом упругости, без значительных повреждений в виде разрывов. При разрушении данные материалы создают опасность поражения людей летящими обломками, поэтому следует избегать применения этих материалов (см. § XII.35). С другой стороны, такие материалы, как строительная сталь, железобетон и армированная каменная кладка, могут подвергаться значительной пластической деформации, не разрушаясь при этом и во многих случаях не теряя заметно своей прочности.

XII.21. Железобетон как строительный материал имеет большие преимущества, так как он обладает характеристиками, которые желательны во взрывоустойчивых конструкциях. Большая масса и медленная ответная реакция относительно тяжелых элементов конструкции, а также возможность достижения неразрывности в соединениях делают железобетон способным выдерживать горизонтально направленные нагрузки. Бетон может применяться для сооружения стен, рассчитанных на сопротивление нагрузкам на сдвиг; сооружение таких стен лишь не намного увеличивает стоимость здания[1]. Однако массивность отдельных элементов здания может вызвать ряд возражений, хотя толстые бетонные стены способствуют ослаблению радиации.

Типы взрывоустойчивых многоэтажных сооружений

XII.22. Тип и устройство сооружения, проектируемого с учетом его значительной сопротивляемости взрыву, будут в известной мере определяться его назначением. Вообще способность здания противостоять воздействию образующихся при взрыве горизонтальных нагрузок повышается с увеличением прочности, жесткости, податливости и величины массы ограждающих и несущих элементов сооружения. Однако существуют также конструктивные формы, которые являются наиболее выгодными с точки зрения сопротивляемости ударным нагрузкам.

XII.23. Если приходится мириться с наличием в существующих зданиях сплошных и частично сплошных наружных и внутренних поперечных стен, то при проектировании новых многоэтажных зданий наиболее удовлетворительное и экономически приемлемое решение должно предусматривать железобетонную конструкцию со стенами, сопротивляющимися нагрузкам на сдвиг. Прочность таких зданий обусловливается главным образом наличием этих стен, обладающих способностью к сопротивлению большим горизонтальным нагрузкам. По сравнению с балками и колоннами эти стены обладают такой жесткостью, что по существу вся передаваемая зданию нагрузка воспринимается ими.

XII.24. Там, где внутренние стены необходимы для противопожарного барьера, для ограждения лестничных клеток или использования в качестве перегородок, они должны проектироваться преимущественно как стены, сопротивляющиеся нагрузкам на сдвиг. Эти же стены можно использовать для восприятия вертикальных нагрузок, заменив, таким образом, каркасные конструкции, которые

[1] Стены, рассчитанные на сопротивление нагрузкам на сдвиг,— это такие стены (или перегородки), которые предназначены для восприятия горизонтальных нагрузок, направленных в плоскости стены, в отличие от нагрузок, направленных перпендикулярно плоскости стены. Конечно, эти стены могут предназначаться для восприятия также и боковых нагрузок (нагрузок второго типа).

обычно используются для этой цели. Однако при возведении несущих стен и опорных элементов желательно избегать использования неармированного кирпича, камня или блоков, так как они плохо выдерживают относительно малые горизонтальные нагрузки.

XII.25. В том случае если назначение здания исключает наличие сплошных (или почти сплошных) наружных стен, желательно предусмотреть возведение на концах здания частично сплошных стен, способных воспринимать нагрузки на сдвиг; эти стены будут дополнять брандмауэры и перегородки стен, рассчитываемые также на нагрузку на сдвиг. Это позволит использовать легкие колонны, воспринимающие вертикальные нагрузки, для остальной части здания. Значительная степень сопротивляемости воздействию взрыва может быть достигнута даже в том случае, если стены, рассчитанные на нагрузку на сдвиг, будут использоваться только для ограждения лестничных клеток, шахт лифтов, водопроводных линий и других трубопроводов.

XII.26. Наличие оконных проемов и легких панелей стенового заполнения может иметь некоторые преимущества. При взрыве окна и легкие перегородки быстро разрушатся, не оказывая существенного сопротивления. В результате уменьшения эффективной площади сопротивления еще до возникновения заметной деформации произойдет снижение величины динамической нагрузки. Однако, несмотря на полезность этих проемов в том смысле, что они уменьшают степень повреждения каркаса и снижают опасность его опрокидывания, их наличие увеличивает угрозу поражения людей и материальных ценностей, находящихся в здании.

XII.27. При возведении железобетонных зданий для придания им монолитности необходимо во всех углах, подверженных значительным напряжениям на изгиб или сдвиг, иметь жесткие соединения элементов. Все пересекающиеся стены и перекрытия должны быть прочно закреплены при помощи выпусков арматуры, и, кроме того, в процессе бетонирования в конструктивных узлах должна быть обеспечена прочная связь между ранее уложенным и свежим бетоном.

XII.28. Железобетонное здание со стенами и перегородками, рассчитанными на восприятие нагрузки на сдвиг и имеющими жесткие соединения, будет вести себя как одно целое. В этом случае стены здания будут передавать реакцию перекрытий и крыши на фундамент. Таким образом, в таком здании можно отказаться от использования тяжелых балок или несущих колонн при сохранении высокой сопротивляемости здания ударным нагрузкам.

XII.29. Сооружения, имеющие стальную решетчатую конструкцию с диагональными связями, могут быть полностью разрушены из-за возникновения местных разрывов элементов связи. Поэтому для предотвращения разрывов в этих связях необходимо обеспечить их достаточную прочность. Для полного использования всех эле-

ментов решетчатой конструкции необходимо, чтобы прочность концевых соединений диагональных связей была больше, чем прочность самих элементов.

XII.30. В многоэтажных зданиях со стальным каркасом прочность концевых соединений должна быть достаточной для того, чтобы можно было в максимальной степени использовать прочность самих элементов каркаса. При жестком соединении плит междуэтажных перекрытий с элементами каркаса сталь и бетон будут способствовать обеспечению устойчивости всего здания в целом. Стеновые панели должны крепиться к элементам каркаса здания таким образом, чтобы соединения выдерживали давление отражения, а также положительные и отрицательные нагрузки, возникающие в результате воздействия ударной волны.

Уменьшение опасности, создаваемой взрывом, в существующих зданиях

XII.31. Кроме учета требований устойчивости к взрыву при проектировании новых зданий, имеется также возможность внесения изменений в конструкцию уже существующих зданий с целью уменьшения ущерба находящимся внутри них материальным ценностям и снижения степени поражения людей в результате воздействия взрыва. Эта проблема гораздо сложнее, чем осуществление соответствующих защитных мер при проектировании новых зданий. Наибольшую опасность для людей и оборудования, находящихся в здании, представляет полное или даже частичное разрушение здания. Поэтому необходимо тщательно обследовать здание с целью выявления его слабых мест, а затем определить наилучшие способы его усиления.

XII.32. Как правило, усиление каркаса железобетонного здания не представляется возможным, однако там, где это возможно, повышение сопротивляемости здания разрушению может быть достигнуто путем замены внутренних стен стенами, рассчитанными на нагрузки на сдвиг. Для повышения устойчивости здания со стальным каркасом эффективным средством может явиться установка дополнительных связей.

XII.33. В прочных зданиях, которые могут, однако, получить различные повреждения, наиболее важным является проведение мероприятий, направленных на предотвращение поражений людей. В зданиях со стальным или железобетонным каркасом железобетонные или усиленные армированием каменные стены, имеющие прочные связи с другими частями здания, обеспечат высокую степень защиты людей, находящихся внутри здания. В зданиях такого типа будет образовываться небольшое количество летящих обломков Плохо закрепленная каменная стена, не усиленная армированием, почти не обеспечит защиту людей и будет являться источником обломков как внутри, так и снаружи здания.

XII.34. Существующие стальные или железобетонные каркасы зданий могут быть усилены путем возведения в системе колонн и балок, сопротивляющихся сдвигающим усилиям стен. Эффективность таких стен будет зависеть от их прочности, а также от прочности их связей с перекрытиями, так как для того, чтобы такие стены были эффективными, они должны передавать боковые нагрузки на фундамент. Наличие таких стен в каркасном здании значительно повышает его устойчивость.

XII.35. Во всех зданиях, независимо от степени их сопротивляемости воздействию взрыва, очень важно уменьшить опасность, создаваемую летящими осколками стекла, сорванным с места оборудованием и различными падающими предметами. При проектировании зданий необходимо учитывать большую опасность поражения людей осколками стекла, поэтому застекленные участки должны занимать площадь, определяемую только необходимостью нормального освещения здания.

XII.36. В существующих зданиях необходимо обратить внимание на опасность поражения при падении электроосветительной арматуры, тяжелых кусков лепных украшений или других предметов. Наилучшим выходом было бы удаление по возможности всех таких опасных предметов. Если же не имеется возможности для полного осуществления таких мер, то необходимо предусмотреть хотя бы частичные меры предосторожности. Выступающие с наружной стороны здания карнизы и архитектурные украшения будут представлять опасность для находящихся поблизости людей и поэтому следует предусмотреть их удаление. Хотя опасность

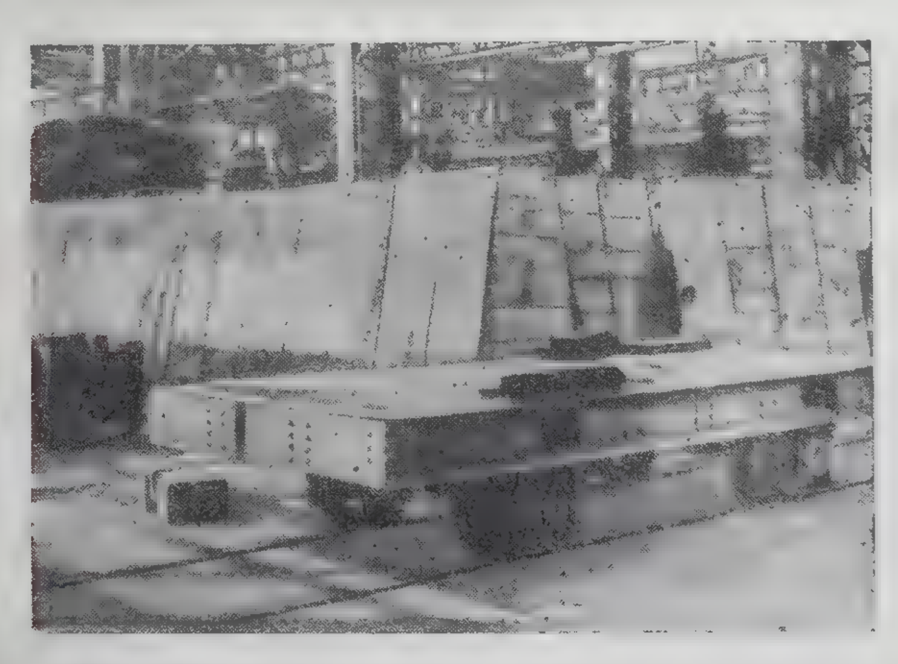


Рис. XII.37а. Противовзрывные железобетонные стены, построенные в Нагасаки (располагались в 1,4 *км* от эпицентра взрыва)

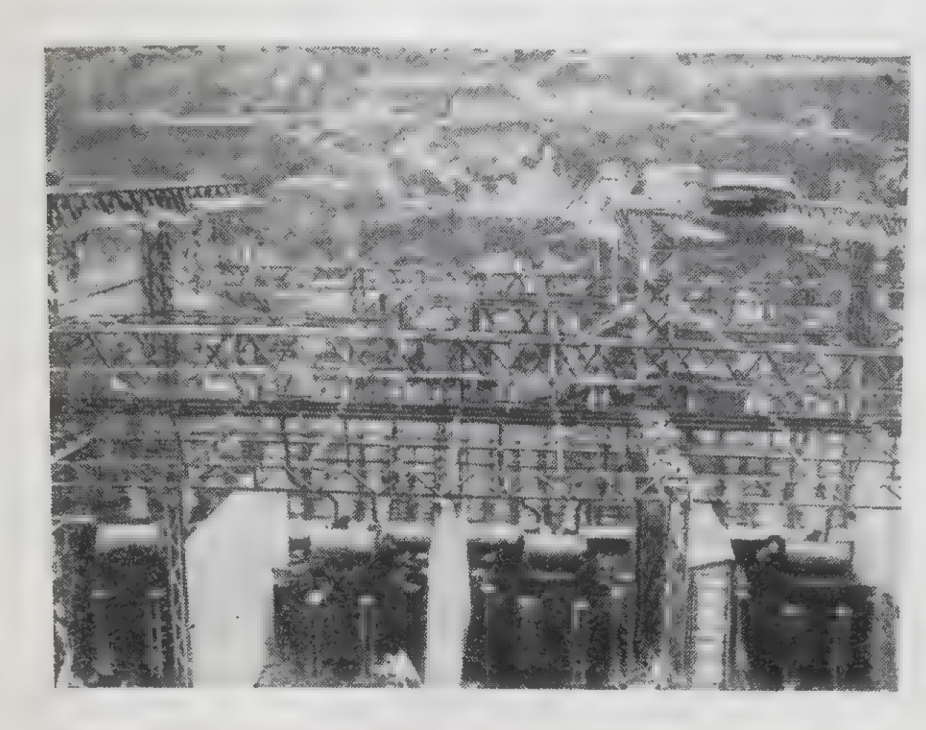


Рис. XII.37б. Противовзрывные железобетонные стены, предназначенные для защиты трансформаторов в Нагасаки (располагались в 1,6 *км* от эпицентра взрыва)



Рис. XII.37в. Заполненные землей противовзрывные деревянные стены, предназначенные для защиты промышленного оборудования (при ядерном взрыве в Нагасаки располагались в 1,4 *км* от эпицентра)

поражения летящими обломками и не является специфической особенностью ядерного взрыва, тем не менее она значительно возрастает благодаря высокому давлению и большой продолжительности действия ударной волны.

XII.37. Противовзрывные стены, устраивавшиеся в прошлую войну для защиты от обычных фугасных бомб, типа, показанного на рис. XII.37а и б, могут обеспечить некоторую защиту от летящих осколков как людей, так и машинного оборудования. Следует принимать особые меры для предотвращения опрокидывания таких стен. В Японии для защиты от воздействия взрыва фугасных бомб применялись бетонные и заполненные землей деревянные стены (рис. XII.37в). Бетонные стены оказались более эффективными; стены второго типа, будучи сильно поврежденными от взрыва ядерной бомбы, тем не менее, предотвратили серьезное повреждение машинного оборудования.

Защита при помощи траншей и заглубленных укрытий

XII.38. Хотя траншеи и простейшие земляные укрытия, отрытые в грунте, не являются в строгом смысле слова сооружениями, тем не менее следует иметь в виду, что они могут обеспечить значительную защиту объектов, чувствительных к нагрузкам торможения. Неглубокие укрытия обеспечивают лишь незначительную защиту, а укрытия и траншеи, глубина которых превышает высоту укрываемых ими объектов, являются весьма эффективным средством уменьшения воздействия на эти объекты нагрузок торможения. В этих условиях горизонтально направленные нагрузки сильно уменьшаются, а получаемые объектами повреждения имеют ограниченный характер и образуются главным образом за счет разрушающего действия ударной волны.

XII.39. В настоящее время пока считается, что единственным удовлетворительным способом защиты объектов от воздействия нагрузок торможения является укрытие их за массивной земляной насыпью или в глубоких рвах, так как земляные насыпи и заглубленные укрытия сами по себе относительно неуязвимы к воздействию взрыва. Однако такие защитные траншеи не рекомендуется применять в городах из-за опасности повреждения укрытых в них объектов падающими обломками. Хотя валы, образованные из заполненных песком мешков, обеспечивали удовлетворительную защиту от взрыва обычных взрывчатых веществ, для защиты от ядерного взрыва они непригодны, так как в этом случае мешки с песком могут быть разбросаны силою взрыва и превращены таким образом в дополнительный поражающий фактор.

XII.40. Характер разрушений машин, чувствительных к нагрузкам торможения (машины для перемещения грунта), показан на рис. XII.40а и рис. XII.40б. Два типа аналогичных машин, находившихся на таком же расстоянии от центра взрыва в глубоком



Рис. XII.40а. Машины для перемещения грунта, подвергшиеся воздействию ядерного взрыва на открытой местности (избыточное давление 2,1 *кг/см²*)

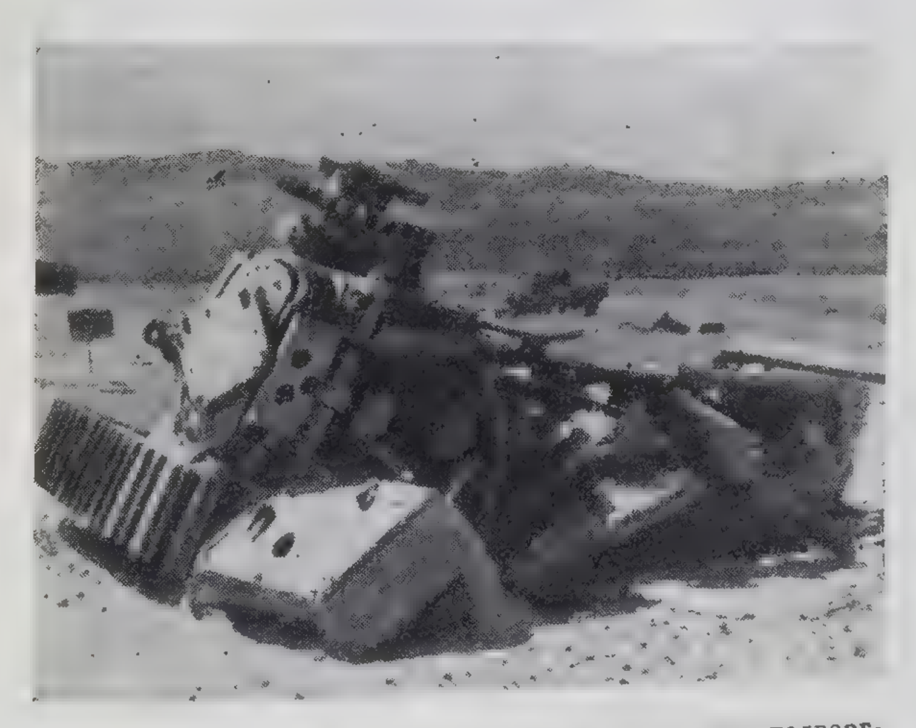


Рис. XII.40б. Машины для перемещения грунта, подвергшиеся воздействию ядерного взрыва на открытой местности (избыточное давление 2,1 *кг/см²*)

рву (рис. XII.40в), по существу не пострадали от взрыва; при этом важно отметить, что ров в основном проходил перпендикулярно направлению распространения ударной волны. Если бы направление распространения ударной волны совпадало с направлением рва, то эти машины, по-видимому, были бы серьезно повреждены. Следовательно, при обеспечении защиты объектов от нагрузок торможения путем укрытия этих объектов в траншеях и рвах большое значение имеет направление траншеи или земляного укрытия по отношению к предполагаемому направлению распространения ударной волны.



Рис. XII.40в. Машины для перемещения грунта, укрытые в глубоком рву; направление рва перпендикулярно направлению распространения ударной волны (избыточное давление 2,1 *кг/см²*)

Противопожарная защита

XII.41. В главе VII указывалось, что возникающие после ядерного взрыва пожары могут начаться от воздействия светового излучения, а также от вторичных факторов, например от опрокидывания печей, разрывов газопроводов и короткого замыкания электросети. Существенное значение для снижения ущерба, вызываемого пожарами, имеют применение противопожарных конструкций в здании, а также проведение мероприятий по освобождению здания от тканевых и других легко воспламеняющихся материалов. Как показали испытания, описанные в § VII.82, хорошо содержащийся дом с двором, не загроможденным воспламеняющимся хламом, не был столь сильно подвержен воздействию светового излучения, как дом, который не имел надлежащего ухода.

XII.42. Методы проектирования зданий и планировки городов в противопожарном отношении хорошо известны, поэтому нет необходимости излагать этот вопрос здесь. Очень важно свести до минимума возможность возникновения пожара от воздействия светового излучения путем удаления куч мусора и других тонкослойных возгораемых материалов, особенно темных материалов, находящихся в здании и подверженных воздействию светового излучения через окна. В связи с этим рекомендуется защищать такие проемы от воздействия светового излучения со всех сторон. Простая побелка оконных стекол значительно снизит степень воздействия светового излучения и таким образом уменьшит вероятность возникновения пожара внутри здания. Другим практическим средством является использование металлических жалюзи, отражающих покрытий на оконных стеклах, а также невоспламеняющихся внутренних штор.

XII.43. При атомных взрывах в Японии деформация каркасов зданий, подвергшихся воздействию высоких температур, была весьма значительной. Исходя из этого опыта, целесообразно защищать стальные колонны и другие металлические элементы от воздействия огня, особенно в зданиях, в которых имеются воспламеняющиеся материалы, или в тех случаях, когда они находятся поблизости от легко загорающихся построек. Кроме того, было установлено, что узкие противопожарные интервалы между зданиями в Японии оказались малоэффективными. Поэтому очень важно при планировании городов предусматривать противопожарные интервалы между зданиями шириною, достаточной для локализации большого пожара. В существующих городах такие интервалы могут быть образованы путем снесения некоторых старых построек. Рекомендуемая ширина противопожарных интервалов составляет не менее 30 *м*.

XII.44. Одним из наиболее важных уроков, извлеченных из опыта атомного нападения на японские города, является необходимость иметь хорошую систему водоснабжения для осуществления борьбы с пожарами. В Нагасаки первоначально напор воды в водопроводе составлял 2,1 *кг/см*^{2}. После взрыва из-за многочисленных разрывов водопроводной линии напор воды упал до 0,7 *кг/см*^{2}, а на следующий день после взрыва давление воды в водопроводе было практически равно нулю. Снижение давления воды в водопроводе в сильной степени способствовало увеличению ущерба, причиненного пожарами. Аналогичная картина наблюдалась и в Хиросима.

УБЕЖИЩА ДЛЯ ЛЮДЕЙ

Введение

XII.45. Идеальное убежище должно удовлетворять требованиям защиты от воздействия ударной волны, волны сжатия в грунте, светового излучения, начальной радиации (потока нейтронов и

гамма-излучения), а также от воздействия остаточной радиации, возникающей при выпадении радиоактивных частиц из радиоактивного облака (внешние и внутренние источники). Однако в действительности такое идеальное убежище построить невозможно из-за наличия неопределенностей, отмеченных в § XII.2. Таким образом, проектирование убежища, как и проектирование сооружений другого типа, должно представлять собою компромиссное решение, содержащее в себе некоторый элемент риска. Например, сооружения специального назначения (см. § XII.53), расположенные под землей, могут противостоять избыточному давлению ударной волны в 7 *кг/см*² и даже более; кроме того, они способны сильно ослабить уровень радиации. Оборудовав такие убежища соответствующей системой вентиляции, можно обеспечить защиту также от выпадающих из радиоактивного облака радиоактивных частиц боевых отравляющих веществ и биологических возбудителей болезней. Однако даже такие убежища будут, вероятно, разрушены наземным или неглубоким подземным взрывом в случае близкого расположения их от эпицентра взрыва.

XII.46. Для защиты людей от поражения ядерным оружием было разработано много различных проектов убежищ, и некоторые типы убежищ, построенных по этим проектам, были подвергнуты воздействию испытательных взрывов. Эти убежища представляют собой различные варианты защитных сооружений — от незначительных модификаций существующих домов, предназначенных для использования небольшими семьями, до специальных взрывоустойчивых сооружений, вмещающих большое количество людей. В домах с подвалами простые и недорогие убежища, устроенные в этих подвалах, могут обеспечить дополнительную защиту, которая может иметь решающее значение в спасении людей во время атомного нападения. Если же в доме не имеется подвалов, то можно принять ряд других эффективных мер, хотя их осуществление, возможно, потребует больших затрат.

XII.47. При проектировании специальных убежищ для защиты людей следует отдать предпочтение подземным (или с грунтовым покрытием) сооружениям, так как при сравнительно небольших затратах такие сооружения уменьшают опасность поражения от светового излучения и ядерной радиации, а также от воздействия ударной волны. При проектировании подобных убежищ особое внимание необходимо обращать на следующие три основные проблемы. Во-первых, технический проект самого сооружения, во-вторых, соответствующая вентиляция помещений, занимаемых людьми, и, в-третьих, наличие адекватно защищенных входов в убежище.

XII.48. Опыт проведенных испытаний ядерного оружия показывает, что методы стандартного строительного проектирования пригодны также для проектирования подземных убежищ, рассчитываемых на избыточное давление ударной волны в 7 *кг/см*². Если конкретная обстановка позволяет допустить меньшее расчетное

давление, то, как правило, наиболее экономичной будет являться постройка неглубоких подземных сооружений или укрытий с грунтовым покрытием более простого типа. Такие сооружения (см. табл. VI.12) при воздействии на них избыточного давления 1,4—2,1 *кг/см²* получают несущественные повреждения. Более уязвимыми к воздействию ударной волны, чем само сооружение, являются воздухопроводы и вентиляционное оборудование, обеспечивающие снабжение убежища воздухом, а также двери, дверные коробки и входные проходы. Поэтому вопрос о них требует специального рассмотрения.

XII.49. Для того чтобы обеспечить достаточную подачу незараженного воздуха во время критического периода пребывания людей в убежище, необходимо, чтобы фильтро-вентиляционное оборудование находилось в действующем состоянии. А для этого воздухопроводы на всасывающей и нагнетающей линиях необходимо оборудовать противовзрывными устройствами. Эти устройства должны понижать энергию ударной волны до такого уровня, который был бы безопасным как для фильтро-вентиляционного оборудования, так и для людей, находящихся в убежище.

XII.50. Входы в убежище должны быть по меньшей мере достаточно широкими, чтобы был обеспечен свободный доступ людей и в некоторых случаях прием транспортных средств. В заключение особо важно отметить, что двери следует рассчитывать на сопротивление разрушению, так как распространение ударной волны через дверные проемы может привести к внезапному повышению давления внутри сооружения до опасного для людей уровня. Необходимо всегда стремиться к тому, чтобы ко всем дверным проемам прилегали соответствующим образом расположенные проходы, которые играли бы роль гасителей взрывной волны и защищали бы двери от летящих обломков, способных повредить их.

Убежища в небольших домах

XII.51. В главе IV отмечалось, что подвалы домов не имели больших повреждений даже в тех случаях, когда сами дома под воздействием ударной волны ядерного взрыва с избыточным давлением 0,35 *кг/см²* были повреждены в такой сильной степени, что в дальнейшем их невозможно было использовать. Поскольку подвалы домов препятствуют распространению светового излучения, а толща грунта, прилегающего к ним с внешней стороны дома, способствует значительному ослаблению ядерной радиации, то подвалы их можно оборудовать под домашние убежища. Во время проведения экспериментальных взрывов в штате Невада было испытано несколько типов убежищ, оборудованных в подвальном этаже.

XII.52. В домах, не имеющих подвалов, или там, где уровень грунтовых вод затрудняет сооружение заглубленного укрытия, для

оборудования домашнего убежища можно использовать ванную комнату. Оборудование убежища достигается путем устройства железобетонных стен и перекрытия над ванной комнатой, а также за счет усиления пола (см. § IV.34). Оконные и дверные проемы защищаются с помощью специальных противовзрывных дверей и ставней. Убежище такого типа обеспечивает хорошую защиту от воздействия ударной волны с избыточным давлением по меньшей мере до 0,35 *кг/см²*, а также от светового излучения. Степень защиты от ядерной радиации будет зависеть главным образом от толщины железобетонных стен и потолка. Чем больше их толщина, тем лучшую защиту они обеспечивают.

Подземные групповые убежища

XII.53. Для обеспечения проведения необходимых мероприятий в экономической, административной и военной областях до атомного нападения, во время него или после него целесообразно иметь групповые убежища, в которых могли бы постоянно укрываться люди, хотя и не обязательно одни и те же. Такие убежища должны быть закрытого типа и должны оборудоваться соответствующей системой вентиляции. В результате многих испытаний было установлено, что в «открытых» убежищах, т. е. таких, в которые открыт доступ ударной волне, величина максимального избыточного давления этой волны не намного отличается от давления вне убежища. Некоторое понижение этого давления может быть достигнуто посредством соответствующего расположения входа и за счет применения отражателей; однако общее впечатление таково, что в стратегически важных пунктах, в которых вероятно атомное нападение, открытые групповые убежища не будут обеспечивать достаточную степень защиты.

XII.54. Схема закрытого подземного группового убежища вместимостью до 30 человек приведена на рис. XII.54. При некотором расширении это убежище может вместить и большее количество людей. Проект его был разработан на основании опытных данных, полученных при различных испытаниях ядерного оружия, во время которых убежища такого типа выдерживали максимальное избыточное давление ударной волны порядка 7 *кг/см²*. Было также установлено, что подобные убежища, как и следовало ожидать, в сильной степени ослабляют действие гамма-лучей и потока нейтронов [1].

---

[1] Основные требования к данному типу убежища были установлены Федеральной администрацией гражданской обороны при содействии армейской исследовательской баллистической лаборатории, армейского химического центра и управления проектирования специальных видов оружия вооруженных сил.

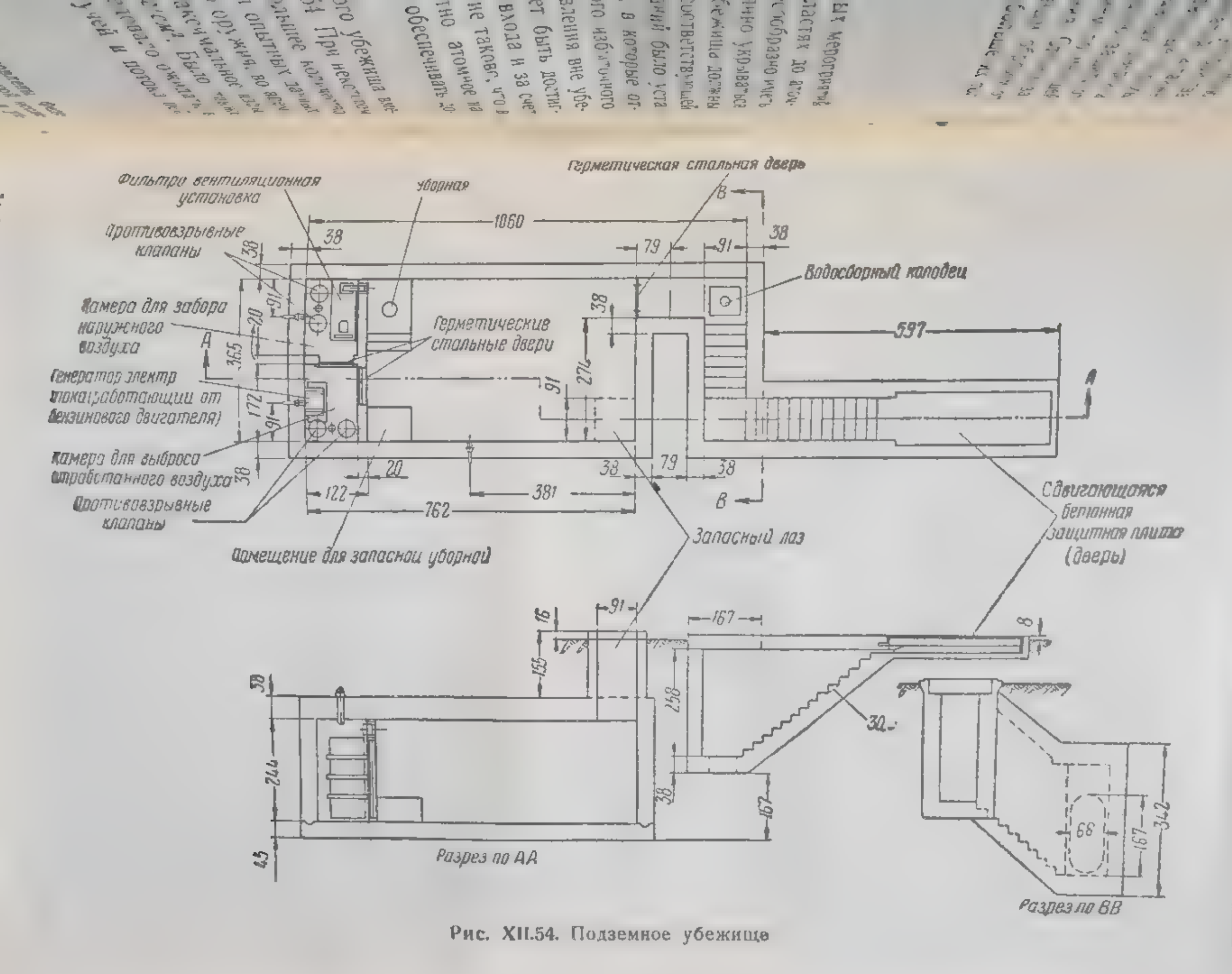


Рис. XII.54. Подземное убежище

XII.55. Основное помещение убежища имеет железобетонные стены толщиной 38 *см*, толщина плит пола — 48 *см*, а толщина плит перекрытия — 53 *см*. Убежище покрыто сверху слоем утрамбованной земли толщиной не менее 1,5 *м*. Вход в убежище выполнен в виде бетонной лестницы, состоящей из двух маршей, расположенных под прямым углом друг к другу. Для более компактного расположения всего убежища направление входа, показанное на рисунке, может быть изменено на 180°. Лестничная клетка убежища на уровне земли перекрывается горизонтальной дверью (плитой) толщиной 20 *см*, изготовленной из профильной стали и железобетона. Дверь удерживается на четырех роликах, передвигающихся по рельсам, она сконструирована таким образом, что, когда она накатывается, масса двери опирается на стальные опорные плиты, расположенные по обеим сторонам лестничной клетки; в результате этого нагрузка ударной волны не воспринимается роликами и их осями. У потолка лестничной клетки смонтировано подъемное устройство, при помощи которого дверь может быть открыта в случае завала ее сверху обломками.

XII.56. Вход в основное помещение убежища осуществляется через стальную герметично закрывающуюся дверь (типа, применяемого в военно-морском флоте) толщиной 12,5 *мм*. В качестве запасного выхода используется вертикальная шахта 0,9×0,9 *м*, закрывающаяся стальной плитой. В нормальных условиях эта шахта заполняется промытым сухим песком, который при необходимости может быть оттуда удален, а находящиеся в убежище люди могут выбраться из убежища по вертикальной лестнице, укрепленной в стене шахты.

XII.57. Фильтро-вентиляционная установка убежища размещается в двух помещениях, показанных на рис. XII.54 (слева). Наружный воздух поступает в воздухозаборную камеру, проходит через фильтр, где очищается от мелких твердых частиц, например от выпавших из радиоактивного облака радиоактивных частиц, а также от биологических возбудителей болезней и отравляющих веществ. Затем воздух по трубопроводам, смонтированным вдоль потолка, поступает во внутреннее помещение убежища. Отработанный воздух удаляется наружу через камеру для выпуска воздуха. Система забора и выпуска воздуха оборудована специальными противовзрывными клапанами, которые сконструированы таким образом, что внезапное повышение давления вне убежища, возникающее при распространении ударной волны, вызывает почти мгновенное закрытие этих клапанов. И наоборот, спад давления в момент отрицательной фазы распространения ударной волны вызовет открытие клапанов. Было установлено, что противовзрывные клапаны действуют удовлетворительно при максимальных избыточных давлениях, достигающих 7 *кг/см*².

XII.58. В камере для выпуска воздуха размещается также генератор электрического тока, приводимый в действие бензиновым

двигателем, который используется в случае выхода из строя основной системы электроснабжения. В подземной цистерне имеется запас горючего на 10 дней работы двигателя. На другом конце убежища имеется подземный резервуар с запасом питьевой воды.

Укрытия, используемые при внезапном атомном нападении

XII.59. Опыты, проведенные при взрывах ядерных и обычных фугасных зарядов, показывают, что пребывание на открытом месте, как правило, связано с бо́льшей опасностью, чем пребывание внутри здания. Поэтому при внезапном атомном нападении необходимо использовать наиболее подходящие для целей защиты укрытия, расположенные поблизости. Например, в случае внезапного атомного нападения хорошим противоатомным убежищем могут служить станции метрополитена; однако они имеются лишь в немногих городах; более доступно использование в качестве укрытий подвалов домов. Наиболее предпочтительны подвалы в огнестойких железобетонных зданиях или в зданиях со стальным каркасом. В этих зданиях вероятность больших нагрузок на надподвальное перекрытие от обломков будет невелика. Однако подвальные помещения даже прочных зданий нельзя сравнить с хорошо спроектированным убежищем, так как расчетные нагрузки на надподвальные перекрытия обычно невелики по сравнению с величиной избыточного давления ударной волны, которое может воздействовать на эти перекрытия.

XII.60. В случае внезапного атомного нападения, когда не имеется возможности использовать прочное укрытие, быстрота действий может сыграть решающую роль в спасении жизни человека. Первым признаком неожиданного ядерного взрыва является вспышка света. При этом очень важно преодолеть инстинктивное стремление взглянуть на источник света; кроме того, надо сделать все возможное, чтобы прикрыть все обнаженные части тела. Человек, находящийся внутри здания, должен немедленно лечь на пол лицом вниз и укрыться под столом или за ним. Такое действие частично защитит его от поражения осколками стекла и другими летящими предметами. Ни в коем случае не следует пытаться встать до тех пор, пока не окончится воздействие ударной волны. Возможным признаком этого будет являться характерный звук бьющегося стекла, осыпание штукатурки и другие признаки разрушения. Звук взрыва также свидетельствует о достижении ударной волной данного места.

XII.61. Человек, застигнутый внезапной вспышкой света от ядерного взрыва на открытой местности, должен броситься на землю и прикрыть одеждой обнаженные части рук, шею и лицо. Хотя такое действие, возможно, слабо защитит от воздействия гамма-лучей и потока нейтронов, оно все же частично предохранит от ожогов, вызываемых световым излучением; при этом степень

его надежности будет зависеть от мощности взрыва. Как указывалось в § VII.53, при ядерном взрыве большой мощности такое действие по защите от светового излучения может оказаться более успешным. Следует иметь в виду, что от принятия таких мер нельзя ничего потерять, но можно многое выиграть. Лежать на земле следует до тех пор, пока не прекратится воздействие ударной волны.

XII.62. Если в пределах одной секунды имеется возможность достичь какого-нибудь укрытия, каким бы незначительным оно ни было (например, успеть попасть внутрь помещения, укрыться под деревом, в канаве или окопе), то такое действие может обеспечить защиту от значительной части начальной радиации и светового излучения. Однако для защиты от ядерной радиации необходимо иметь значительный слой материала, которого может не оказаться на открытом месте. Если же быстро лечь на землю, то некоторую защиту при этом могут обеспечить сама местность и окружающие предметы на ней. Но поскольку во время подъема вверх радиоактивного облака ядерная радиация все еще будет распространяться в направлении к поверхности земли, то защита при таком способе укрытия будет лишь частичной. Кроме того, в результате явления рассеивания радиация будет исходить со всех направлений.

ЗАЩИТА ОТ РАДИОАКТИВНОГО ВЫПАДЕНИЯ

Пассивные и активные мероприятия

XII.63. Защита от остаточной ядерной радиации, возникающей при выпадении радиоактивных частиц из радиоактивного облака, представляет собой трудную проблему. Это объясняется не только тем, что ядерная радиация невидима и для ее обнаружения и измерения требуются специальные приборы, но также и тем, что выпадение из радиоактивного облака радиоактивных частиц носит распространенный и устойчивый характер. Например, в случае наземного взрыва ядерного заряда с большим тротиловым эквивалентом площадь заражения выпадающими радиоактивными частицами может намного превосходить площадь, поражаемую ударной волной, световым излучением и начальной радиацией. Кроме того, остаточная радиация продолжает оказывать свое воздействие в течение продолжительного периода времени, тогда как остальные поражающие факторы ядерного взрыва исчезают по истечении нескольких секунд.

XII.64. Мероприятия, проводимые для защиты от остаточной радиации, разделяются на пассивные и активные. Пассивные мероприятия предусматривают оставление людей в зараженной зоне, причем принимаются все меры для их укрытия от гамма-излучения, в особенности от возникающего в результате распада выпавших радиоактивных частиц. Как указывалось в главе IX, даже под-

вал деревянного каркасного дома имеет коэффициент ослабления радиации, приблизительно равный 10, а в массивном здании или убежище, покрытом слоем земли в несколько футов, это ослабление может быть гораздо большим.

XII.65. Существуют два вида активной защиты, которые будут рассмотрены ниже. Одним из них является эвакуация населения из зараженной зоны в незараженные либо в меньшей степени зараженные районы. Однако это мероприятие не так просто осуществить на практике, как может показаться с первого взгляда, так как оно обычно связано с прохождением людей через зараженные районы без средств защиты. В результате этого суммарная доза радиации, полученная ими, может оказаться большей, чем в случае принятия пассивных мер защиты без осуществления эвакуации.

XII.66. Другим возможным активным мероприятием является дезактивация после прекращения выпадения радиоактивных частиц из радиоактивного облака. В большинстве случаев могут быть проведены те или иные мероприятия, способствующие уменьшению количества выпавших радиоактивных частиц, например, на крышах домов или улицах. Ниже будут рассмотрены некоторые из наиболее общих методов дезактивации. Однако следует иметь в виду, что осуществление этих мероприятий неизбежно связано с определенным риском, так как личный состав дезактивационных команд подвергается воздействию достаточно высоких уровней радиации.

XII.67. Масштабы осуществления пассивной защиты, эвакуации населения и дезактивации будут зависеть от конкретно сложившихся условий, и в каждом отдельном случае они могут изменяться в широких пределах. Поэтому здесь невозможно сделать каких-либо определенных рекомендаций. Каждое конкретное мероприятие должно проводиться по решению ответственных лиц; это решение должно основываться на данных об уровнях радиации и о других факторах, дополняющих характеристику остаточной радиации. Анализ вопросов, излагаемых в последующих разделах данной главы, по-видимому, может помочь установить отправные принципы, которыми следует руководствоваться при проведении вышеуказанных мероприятий.

Действия по защите

XII.68. Как было отмечено в начале настоящей главы (см. § XII.3), проблема эвакуации населения из районов атомного нападения является весьма трудной вследствие возможного выпадения радиоактивных частиц из радиоактивного облака. Здесь будут рассмотрены некоторые условия обстановки, которые должны приниматься во внимание, перед тем как приступать к переброске больших масс людей. Прежде всего всегда возможно внезапное изменение направления ветра таким образом, что эвакуируемые группы людей непреднамеренно попадут в зону выпадения радио-

активных частиц, двигающихся по ветру. Опасность заражения может возникнуть также в результате последующих взрывов в других пунктах после того, как эвакуация уже начата. При любых условиях очень трудно предсказать направление распространения выпадающих радиоактивных частиц, и для такого предсказания необходимо иметь подробные и непрерывно поступающие сведения о направлении ветра над огромными территориями и на различных высотах вплоть до самых значительных. После того как отдан приказ на эвакуацию, практически его невозможно будет отменить или хотя бы изменить основное направление движения масс людей.

XII.69. Возможно, что наилучшим первоначальным шагом будет принятие пассивных мер защиты путем подыскания убежищ в относительно закрытых зданиях. Такие укрытия способны значительно снизить интенсивность гамма-излучения, распространяющегося от внешних источников. Для предотвращения попадания в организм радиоактивной пыли во время пребывания в убежищах, возможно, потребуется оборудование в них фильтро-вентиляционных установок. Однако в большинстве случаев воздух будет проникать внутрь здания через трещины и неплотности, что позволяет создать внутри него удовлетворительные условия для нормального дыхания людей даже при закрытых дверях и окнах. Правда, при этом в здание может проникнуть также некоторое количество выпадающих из радиоактивного облака радиоактивных частиц, но на основе опыта, полученного на Маршалловых островах во время ядерных испытаний 1954 г. (см. § XII.115 и далее), можно предположить, что вдыхание таких радиоактивных частиц в количестве, в котором они обычно проникают внутрь здания, не будет представлять серьезной опасности.

XII.70. Так как в убежище придется находиться от двух до семи дней и даже более (в зависимости от уровня радиации вне убежища), то потребуется обеспечить это убежище продовольствием и питьевой водой, которые необходимо укрыть от попадания в них радиоактивных частиц. Если имеется достаточное количество воды, то зараженное продовольствие необходимо промыть перед употреблением (см. § XII.97).

XII.71. В местах, расположенных сравнительно близко к эпицентру взрыва, выпадение радиоактивных частиц будет наблюдаться вскоре после взрыва, и уровень радиации здесь вначале будет высоким. Поэтому, возможно, придется оставаться в убежище в течение нескольких дней, после чего можно будет покинуть убежище без риска получения большой дозы облучения, вызывающей серьезное поражение. Оставление убежища с целью эвакуации зоны заражения или для проведения дезактивационных работ первой очереди будет связано с определенным риском, на который не следует идти (за исключением чрезвычайных случаев) без указаний ответственных лиц, располагающих данными о радиационной обстановке в окружающем районе.

XII.72. Чем большее расстояние отделяет любой район от центра взрыва в общем направлении распространения выпадающих радиоактивных частиц, тем ниже будет начальный уровень радиации и тем короче будет период осуществления мер пассивной защиты для данного района. Однако в достаточно сильно зараженных зонах, по-видимому, необходимо будет оставаться в убежище в течение одних-двух суток для защиты от остаточного гамма-излучения. На самой ранней стадии выпадения радиоактивных частиц активность продуктов распада очень высока, но уже по истечении 49 часов, или, грубо говоря, двух суток, она понижается примерно до 1% от величины активности, которая наблюдалась через 1 час после взрыва.

XII.73. Указать заранее, при каком уровне радиации на местности можно будет покинуть убежище, не представляется возможным. Многое будет зависеть от характера мероприятий, осуществляемых вслед за периодом пребывания в убежище (например, эвакуации или дезактивации или того и другого одновременно), от продолжительности времени, необходимого для проведения этих мероприятий, а также от величины суммарной дозы облучения, полученной в период осуществления пассивных мер защиты. При помощи графиков, приведенных в конце данной главы, можно определить примерные дозы облучения, которые могут быть получены при различных условиях. Такие сведения будут необходимы перед тем, как принять какое-либо решение в любой данной обстановке.

XII.74. Выше было сделано предположение, что между моментом взрыва и началом выпадения радиоактивных частиц из радиоактивного облака проходит значительное время. Если же по той или иной причине не последовало предварительного предупреждения об угрозе выпадения радиоактивных частиц, то необходимо принять в основном те же меры, какие указывались ранее. Первым действием, которое надо осуществить по возможности быстрее, является отыскание подходящего убежища, обеспечивающего максимальное ослабление гамма-излучения, исходящего от внешних источников. Быстрота действий при этом является важным фактором, так как интенсивность излучения от выпадающих радиоактивных частиц вскоре после взрыва чрезвычайно высока, но она довольно быстро падает с течением времени. Спустя несколько дней люди могут эвакуироваться из убежища в таком направлении, где вероятность облучения минимальна.

XII.75. Необходимо подчеркнуть, что опасные радиоактивные частицы, выпадающие из радиоактивного облака, могут быть невидимы для глаза, поэтому для обнаружения этих частиц потребуются соответствующие приборы, чувствительные к ядерным излучениям. Правда, во время испытаний ядерного оружия 1 марта 1954 г. на Маршалловых островах в некоторых местах выпадавшие из радиоактивного облака частицы можно было наблюдать в виде белого порошка или пыли.

Радиационная разведка

XII.76. Вскоре после ядерного взрыва необходимо произвести общую радиационную разведку. В первую очередь она, возможно, будет необходима для аварийных команд, которым надо знать уровень радиации в зараженной зоне перед тем, как войти в нее. Необходимо определить наилучшие, т. е. наименее зараженные, пути как на подступах к этой зоне, так и в самой зоне. Кроме того, лицам, находящимся в убежищах, расположенных на зараженном участке, потребуются сведения о радиологической обстановке на местности с целью планирования эвакуации. В дополнение к этому необходимо определить и обозначить сильно зараженные участки, чтобы предотвратить случайное попадание на эти участки людей.

XII.77. По-видимому, наиболее быстрым способом оценки степени опасности радиоактивного заражения на ранней стадии является воздушная радиационная разведка. Большое преимущество воздушной разведки по сравнению с другими видами разведки состоит в том, что ее действиям не мешают завалы, которые делают дороги непроходимыми для наземного транспорта, и что эти действия мало зависят также от уровня радиоактивного заражения. Гамма-излучение, образуемое продуктами распада, находящимися на поверхности земли, благодаря своей большой проникающей способности в воздухе может быть обнаружено с помощью чувствительных приборов с высоты в несколько тысяч футов. Низко летящие самолеты или вертолеты, снабженные дозиметрическими приборами для измерения мощности дозы гамма-излучения, могут летать над зараженным районом по заранее намеченным маршрутам. Первоначально полеты могут осуществляться на высоте около 450 *м* (1500 футов), где уровень радиации ниже примерно в 100 раз, чем уровень радиации на поверхности земли (см. рис. IX.122). Затем, если необходимо, полеты могут совершаться на более низких высотах для более точного определения зараженных районов.

XII.78. По значениям уровней радиации на известной высоте, зарегистрированных дозиметрическими приборами на борту самолета, можно вычислить примерную мощность дозы радиации в рентгенах в час, которая существует на поверхности земли или воды. Из-за уменьшения интенсивности гамма-излучения, исходящего от продуктов распада, точное отношение между показаниями дозиметрических приборов в воздухе и мощностью дозы радиации на поверхности земли будет зависеть от многих факторов, в том числе от характера рельефа местности, а также от времени, прошедшего после взрыва до момента измерения радиоактивности. Если не имеется больше никаких данных, то для оценки ослабления радиации на известной высоте относительно радиоактивности, существующей на поверхности земли, могут быть использованы данные, приведенные на рис. IX.122.

XII.79. Воздушная радиационная разведка имеет важное значение, так как она может быть осуществлена быстро и позволяет получить ценные сведения, которые, возможно, нельзя добыть каким-либо другим путем. Однако результаты такой радиационной разведки могут служить лишь в качестве ориентировочных данных, поэтому они должны дополняться результатами наблюдений, произведенных на поверхности земли. С другой стороны, данные дозиметрических измерений в воздухе окажут большую помощь в планировании наземной радиационной разведки. На первых стадиях будут определены общие границы зараженного района, а позднее будет проведено более детальное обследование с целью определения уровней радиации в специфических пунктах, имеющих оперативное значение, установления примерных контуров, выражающих определенные значения мощности дозы, а также определения сильно зараженных участков, на которых степень зараженности превышает среднюю.

XII.80. Необходимо помнить, что личный состав, выполняющий операции по радиационной разведке, будет непрерывно подвергаться воздействию радиоактивного излучения, имеющего иногда высокую интенсивность. Личный состав разведки по возможности должен передвигаться на машинах, которые обеспечивают известную степень защиты, ослабляя гамма-излучение, например, за счет соответствующего экранирования. Для того чтобы избежать опасных доз радиации, превышающих допустимые, дозиметристы должны постоянно иметь при себе приборы, которые в любое время показывали бы суммарную дозу радиации, полученную ими. Тогда они будут знать, в какой момент времени им следует возвратиться в свое расположение для того, чтобы их сменила новая группа дозиметристов, не подвергшихся еще облучению, которая могла бы продолжить радиационную разведку. Если имеются результаты предварительной радиационной разведки, то, используя приведенные в конце настоящей главы графики, действия разведки можно заранее наметить путем предварительного планирования.

Мероприятия по дезактивации[1]

XII.81. Поскольку радиоактивные вещества не могут быть уничтожены, то их дезактивация неизбежно связана с удалением источников радиоактивного излучения (например, выпадающих из радиоактивного облака радиоактивных частиц) с зараженных участков местности и объектов. Все мероприятия по дезактивации, таким образом, имеют две стороны: первая — удаление радиоактивных ве-

---

[1] Подробное рассмотрение методов дезактивации и применяемого для этой цели оборудования содержится в наставлении TM-11-6 «Radiological Decontamination in Civil Defense», разработанном Федеральной администрацией гражданской обороны.

ществ и вторая — расположение их в безопасном месте. Если второй стороне не уделяется должного внимания, то в конечном итоге весь комплекс мероприятий может принести лишь незначительную пользу либо вовсе не принести никакой пользы. Изоляция радиоактивных веществ (при которой они не перемещаются), например путем засыпки их толстым слоем грунта, могла бы быть эффективным средством, сочетающим оба мероприятия в одной операции.

XII.82. Дезактивация может быть либо частичной, либо полной. Частичная дезактивация представляет собой быстрое, но не полное удаление радиоактивных веществ или их покрытие слоем земли при осуществлении этих мероприятий в широких масштабах. Целью частичной дезактивации является возможно быстрое снижение уровня радиации до величины, при которой личный состав смог бы использовать механическое оборудование или оставаться в зараженном районе по крайней мере в течение хотя бы ограниченного промежутка времени. Затем может быть осуществлена полная дезактивация, представляющая собой длительный процесс. Как правило, дезактивация не может быть абсолютно полной (да этого и не требуется). Однако она должна быть доведена до такой степени, при которой для данных конкретных условий будет устранена сколько-нибудь серьезная опасность поражения.

XII.83. Решение о проведении дезактивации будет зависеть от ряда обстоятельств, а его осуществление будет связано с определенным риском. Так как для личного состава, проводящего дезактивационные работы, всегда существует некоторая опасность заражения, эти работы следует проводить возможно позже, с тем чтобы использовать процесс естественного радиоактивного распада. Однако в некоторых случаях может потребоваться принятие срочных мер, и тогда дезактивацию придется проводить при достаточно высоких уровнях радиации. При таких условиях, возможно, придется производить через короткие промежутки времени замену работающего личного состава людьми, которые не подвергались ранее облучению.

XII.84. Очень полезно запомнить несколько принципов, относящихся к радиоактивному заражению и дезактивации. Вследствие того, что радиоактивные вещества выпадают в виде мелких частиц, они имеют тенденцию к наибольшему оседанию на горизонтальных поверхностях. Эти поверхности будут, таким образом, заражены в более сильной степени, чем вертикальные поверхности. Отсюда следует, что при осуществлении предварительной дезактивации вертикальные поверхности по меньшей мере можно не принимать во внимание. Большая часть выпадающих радиоактивных частиц может быть легко удалена либо путем смывания их струей воды, либо посредством вытирания; при этом желательно применение пылесосов, что предотвратит вдыхание радиоактивной пыли.

XII.85. Частичная дезактивация обычно может быть осущест-

влена одним из отмеченных выше способов. Для гладких (например, окрашенных и металлических) поверхностей применимы мокрые методы (смыванием), а для пористых материалов, например тканей, кирпича, бетона и камня, предпочтительны сухие методы дезактивации. Вообще говоря, смывание водой может применяться для дезактивации наружных поверхностей зданий и транспортных средств, в то время как применение пылесосов более удобно для проведения дезактивации внутри зданий и транспортных средств. Испытания различных способов дезактивации показали, что бо̀льшая часть радиоактивных веществ может быть удалена при помощи этих простых способов. Незначительная часть радиоактивных веществ прочно удерживается на поверхности и поэтому требует применения более эффективных методов дезактивации, например использования химических веществ или абразивных материалов[1].

XII.86. В городе дезактивация может быть осуществлена путем смывания радиоактивных частиц с крыш зданий, а также с поверхностей улиц сильной струей воды. Радиоактивные вещества при этом будут уноситься в трубы ливневой канализации, что может представлять лишь небольшую опасность. Кроме того, мощность дозы радиации внутри зданий может быть снижена также путем насыпки вокруг здания слоя незараженной земли или путем снятия верхнего слоя грунта и удаления его при помощи бульдозера.

XII.87. В связи с вопросом о перемещении зараженной земли (целью которого может быть также и создание проходов) важно отметить, что гамма-излучение, создаваемое продуктами распада, обладает большой проникающей способностью в воздухе. Например, в центр большой, ровной и равномерно зараженной площади на высоте 0,9 *м* от поверхности земли до 50% мощности дозы радиации поступает с расстояния более чем 7,6 *м* и около 25% — с расстояния более чем 15,2 *м*. Таким образом, полное удаление зараженного верхнего слоя земли с площади радиусом в 15,2 *м* снизит мощность дозы радиации в центре этой площади примерно до одной четверти ее первоначального значения. Однако если зараженная земля не удалена на значительное расстояние, а только перемещена до внешних границ этого круга, то мощность дозы радиации будет значительно больше, чем одна четвертая часть ее первоначальной величины.

XII.88. Очевидно, что в случае необходимости устройства проходов на открытой местности, значительная часть которой заражена, снятие при помощи бульдозера верхнего зараженного слоя земли и перемещение его в сторону дадут положительный эффект лишь в том случае, если при этом будет очищена достаточно широкая полоса местности. Так, если ширина очищенной полосы составляет

---

[1] Наведенная радиоактивность, вызванная воздействием потока нейтронов, трудно устранима, но радиоактивное заражение такого типа имеет существенное значение только вблизи центра взрыва (см. § IX.18).

76 *м*, то мощность дозы радиации в середине этой полосы будет снижена до одной десятой ее первоначальной величины. Аналогичный результат может быть получен путем снятия верхнего слоя земли и засыпки его незараженной землей. Для того, чтобы снизить мощность дозы радиации примерно в 10 раз, потребуется насыпать слой земли толщиной около 0,3 *м*.

XII.89. Сильно зараженная одежда, а также ковры, занавеси и мебель с тканевой обивкой должны быть удалены и закопаны в землю или сложены в каком-либо изолированном месте. В тех случаях, когда вследствие естественного распада степень радиоактивного заражения значительно снизится или когда первоначальная зараженность не слишком высока, эффективным способом дезактивации одежды и тканей может оказаться их стирка, при помощи которой можно восстановить пригодность этой одежды и тканей для дальнейшего использования. В некоторых случаях может оказаться достаточной тщательная чистка мебели пылесосами, однако, перед тем как использовать мебель по назначению, необходимо произвести ее дозиметрический контроль при помощи специальных приборов.

Защита команд, работающих в зараженной зоне

XII.90. Весь личный состав, перед тем как войти на зараженный участок для проведения радиационной разведки, дезактивации или других чрезвычайных мероприятий, должен подогнать свою одежду так, чтобы предотвратить попадание на кожу пыли. Основной целью этой предосторожности является сведение к минимуму возможности «бета-ожогов», которые являются следствием непосредственного контакта радиоактивной пыли с кожей (см. § XI.94). Конечно, необходимо помнить, что одежда практически не защищает от гамма-излучения и что опасность поражения гамма-излучением продолжает в полной мере существовать и при хорошо подогнанной одежде.

XII.91. При проведении дезактивации сухим способом рекомендуется надевать тяжелые брюки и обувь из прочного и толстого материала, а также хлопчатобумажные или брезентовые перчатки и плотно прилегающий головной убор. Во время пребывания на запыленных участках рекомендуется завязывать нижнюю часть брюк и концы рукавов (поверх перчаток) для того, чтобы предотвратить проникание радиоактивных веществ к телу. Повязанный вокруг шеи шарф также окажется полезным в этом отношении. После атомного нападения с поверхности земли поднимется много пыли, но не обязательно, что она вся будет радиоактивной. Однако во всех случаях целесообразно соблюдать меры предосторожности для снижения возможности вдыхания больших количеств пыли. Следовательно, при работах на местности с большим количеством пыли желательно иметь защитные очки и противопыльную маску.

XII.92. При проведении дезактивации мокрым способом необходимо использовать водонепроницаемую одежду, резиновые сапоги и резиновые перчатки (рис. XII.92); при отсутствии повреждений они могут обмываться струей воды и использоваться повторно.

XII.93. Кроме принятия мер, направленных на предотвращение попадания радиоактивных веществ на кожу, необходимо также обеспечить условия, при которых личный состав, работающий в зараженной зоне, не подвергался бы чрезмерному облучению. Для



Рис. XII.92. Водонепроницаемая одежда, используемая при проведении дезактивации мокрым способом

этого каждый член команды должен иметь самопоказывающий прибор индивидуального контроля, иногда называемый **организационным дозиметром,** регистрирующим получаемую суммарную дозу радиации. Были сконструированы различные типы дозиметров, и в настоящее время имеются простые, надежные и недорогие приборы, которые могут выпускаться в больших количествах [1].

XII.94. Дозиметрические приборы для определения интенсивности радиоактивного излучения (мощности дозы) потребуются

[1] Описание дозиметров и других приборов для измерения радиоактивности, разработанных Федеральной администрацией гражданской обороны, содержится в наставлении TB-11-20 «Radiological Instruments for Civil Defense».

для обнаружения районов с высоким уровнем заражения и для определения допустимого времени пребывания на зараженном участке. Как правило, для этой цели будут пригодны приборы, предназначенные для измерения мощности дозы гамма-излучения.

Кроме того, для обнаружения на поверхности тела бета-активных частиц будут пригодны специальные приборы, чувствительные к бета-излучениям.

XII.95. В связи с проблемой защиты личного состава возникает вопрос о допустимом количестве ядерного излучения для лиц, принимающих участие в проведении мероприятий по противоатомной защите. Дать на это точный ответ трудно, если не невозможно, так как он в значительной степени будет зависеть от особенностей обстановки.

XII.96. В тех случаях, когда необходимы немедленные действия по осуществлению чрезвычайных мероприятий, редко бывает возможно заранее предсказать мощность дозы, которая будет получена в результате осуществления таких действий, поэтому невозможно предсказать и характер последствий воздействия ядерной радиации на работающий персонал. Однако в том случае, если имеется возможность оценить опасность поражения на основе имеющихся данных об уровнях радиации, вероятно, будет возможно установить и примерные данные о допустимых дозах облучения при чрезвычайных условиях [1].

Продовольствие и питьевая вода

XII.97. Хорошо укрытые или завернутые продукты питания, а также продукты, хранящиеся в закрытой таре, будут заражены лишь в малой степени либо вовсе не будут подвергнуты заражению. Это относится к консервированным продуктам в металлических или стеклянных банках, а также к любым продуктам в непроницаемой для пыли упаковке. Если зараженной окажется только внешняя поверхность тары, то единственным мероприятием, которое необходимо осуществить в этом случае, будет тщательное удаление всех осевших на эту поверхность радиоактивных частиц, например, посредством смывания [2]. Даже овощи могут быть подвергнуты удовлетворительной дезактивации при помощи смывания. Если при этом будут удалены верхние слои, например путем срезания кожуры, то овощи окажутся совершенно безопасными для потребления человеком. Незащищенные пищевые продукты, обла-

---

[1] См. технический бюллетень Федеральной администрации гражданской обороны TB-18-1 «Emergency Exposires to Nuclear Radiation».

[2] Продукты питания могут оказаться зараженными даже при хранении в таре вследствие наведенной нейтронами радиоактивности, но маловероятно, чтобы это явление имело существенное значение в тех случаях, когда упакованные или консервированные продукты не получили механических повреждений в результате взрыва (см. § IX.25).

дающие абсорбционной способностью и подвергшиеся радиоактивному заражению, должны быть удалены и закопаны в земле.

XII.98. Что касается различных сельскохозяйственных культур, выращенных на зараженной почве, то по этому вопросу в настоящее время еще не имеется достаточных данных. Некоторые радиоактивные изотопы могут быть усвоены растениями, но их природа и количество будут изменяться в зависимости от вида растения, а также, по-видимому, в зависимости от свойств почвы (см. § IX.99). Единственное, что можно сказать в настоящее время, является то, что к растениям, выращенным на зараженной почве, следует относиться с подозрением до тех пор, пока безопасность их потребления в пищу не будет подтверждена дозиметрическим контролем.

XII.99. Источники водоснабжения, как правило, находятся на значительном расстоянии от городов, которые могут явиться объектом атомного нападения. Тем не менее если бассейн водоема, служащего источником водоснабжения, окажется в зоне интенсивного выпадения радиоактивных частиц из радиоактивного облака, то может иметь место значительное заражение воды. Другой возможностью радиоактивного заражения воды является выпадение в реку или водохранилище радиоактивных частиц или взрыв ядерного заряда поблизости от водохранилища. В большинстве случаев следует ожидать, что в результате действия многих факторов, например вследствие разбавления потоком, естественного распада и поверхностного поглощения грунтом (абсорбции), вода окажется пригодной для потребления по крайней мере при чрезвычайных обстоятельствах, за исключением, возможно, ограниченного промежутка времени, следующего непосредственно за ядерным взрывом. При любых обстоятельствах там, где вода, поступающая из водохранилища, подвергается систематической обработке, включая коагуляцию, осаждение и фильтрацию, она, по всей вероятности, будет очищена от значительной части радиоактивных веществ.

XII.100. Так как грунт обладает способностью поглощать и удерживать некоторые элементы за счет процесса абсорбции, то подземные источники воды будут в основном свободны от радиоактивного заражения. По этой же причине даже не особенно глубоко заложенные колодцы, расположенные под зараженным грунтом, могут служить безопасными источниками питьевой воды при условии отсутствия непосредственного стока воды в них с поверхности земли.

XII.101. В некоторых городах вода, потребляемая для хозяйственно-бытовых нужд, поступает непосредственно из реки, подвергаясь лишь обработке хлорированием. Такая вода может оказаться непригодной для потребления в течение нескольких дней, однако в результате разбавления и процесса естественного распада радиоактивных веществ степень ее зараженности будет с течением времени уменьшаться. В подобных случаях необходимо произвести исследование на предмет установления радиоактивности воды и пре-

кратить ее подачу для потребления населением до тех пор, пока ее радиоактивность не снизится до безопасного уровня. Исходя из того, что радиоактивное заражение воды происходит от продуктов распада, в таблице XII.101 приводятся допустимые суммарные уровни бета- или гамма-активности при потреблении воды в течение соответственно 10 и 30 суток. Например, если предполагается регулярное потребление воды в течение 30 суток, то максимально допустимая радиоактивность при этом составляет $3 \cdot 10^{-2}$ микрокюри на 1 *см*³ воды (см. § IX.125 и далее). С другой стороны, если вода должна потребляться в течение более короткого промежутка времени, то при чрезвычайных обстоятельствах пропорционально допустима и более высокая степень ее радиоактивности.

Таблица XII.101

Допустимые нормы радиоактивного заражения (бета- или гамма-активность) питьевой воды при чрезвычайных условиях

Период времени, в течение которого потребляется вода, сутки	Допустимые нормы заражения воды	
	микрокюри на 1 *см*³	число распадов в 1 секунду на 1 *см*³
10	9×10^{-2}	3×10^{3}
30	3×10^{-2}	1×10^{3}

XII.102. При чрезвычайных условиях предельно допустимое содержание в воде альфа-активных веществ, например урана и плутония, значительно ниже по сравнению с данными, приведенными в табл. XII.101. Однако можно полагать, что эти элементы будут создавать угрозу заражения питьевой воды только в исключительных случаях.

XII.103. Если при нормальном водоснабжении вода не подвергается какой-либо другой обработке, кроме хлорирования, и если не имеется запасного источника водоснабжения, то при чрезвычайных условиях в случае радиоактивного заражения воды необходимо обеспечить устройство колонок с ионным обменом. При потреблении воды в небольших масштабах для этой же цели можно использовать бытовые опреснители. В отдельных случаях для питьевых целей возможно использование воды, находящейся в виде запаса в домах в водоподогревательных установках (доступ в эти установки зараженной воды должен быть перекрыт).

XII.104. В больницах и на судах достаточное количество питьевой воды в чрезвычайных условиях может быть получено при помощи дистилляции. Например, после испытаний ядерного оружия у атолла Бикини в 1946 г. было установлено, что после перегонки зараженной морской воды она стала совершенно безопасной и пригодной для питьевых целей; радиоактивные вещества при этом остаются в накипи и в остатке соленой воды. Однако следует под-

черкнуть, что простое кипячение воды, зараженной выпавшими из радиоактивного облака частицами, абсолютно бесполезно с точки зрения уничтожения радиоактивности.

Дозы радиации и фактор времени в зараженных районах

XII.105. При планировании как активных, так и пассивных защитных мероприятий или действий по ведению радиационной разведки района, зараженного продуктами распада, необходимо либо установить допустимое время пребывания в этом районе, в течение которого будет получена заранее определенная доза радиации, либо определить дозу радиации, которая будет получена за определенный промежуток времени. Основные уравнения и относящиеся к ним графики (см. рис. IX.8 и IX.12) были приведены в главе IX, однако эти же самые результаты могут быть выражены в другой форме, являющейся более удобной для многих целей [1].

XII.106. Если в определенное время для данного участка местности известна мощность дозы радиации, образуемой продуктами распада, то для определения мощности дозы в любое другое время для того же самого участка местности может быть использована номограмма, изображенная на рис. XII.106, при условии, что в состоянии выпавших радиоактивных частиц не произошло каких-либо изменений, кроме естественного распада. Эта же номограмма может быть использована также для определения времени, прошедшего после взрыва, по истечении которого мощность дозы достигнет определенной величины. Если же в промежутке между упомянутыми моментами времени произошли какие-либо изменения в обстановке либо в результате дополнительного заражения, либо в результате осуществленной дезактивации, то данные, полученные при использовании номограммы, окажутся неправильными.

XII.107. Если известна мощность дозы радиации на каком-либо зараженном участке в любое заданное время, то для определения суммарной дозы радиации, полученной за определенный промежуток времени пребывания на этом участке, следует пользоваться графиком, показанным на рис. XII.107, вместе с номограммой, представленной на рис. XII.106. Эти графики могут также использоваться для определения момента времени, после которого возможно начать осуществление отдельных операций, чтобы не получить суммарной дозы радиации, превышающей определенную величину.

XII.108. Второй способ определения дозы радиации на зараженном участке основан на использовании известных данных о мощности дозы радиации в момент входа на этот участок. Порядок расчета, показанный на примерах к рис. XII.107 (при этом используется также рис. XII.106), может быть затем использован для

[1] Для производства быстрых расчетов весьма полезны приборы типа логарифмической линейки, о которых упоминалось в сноске к § IX.11.

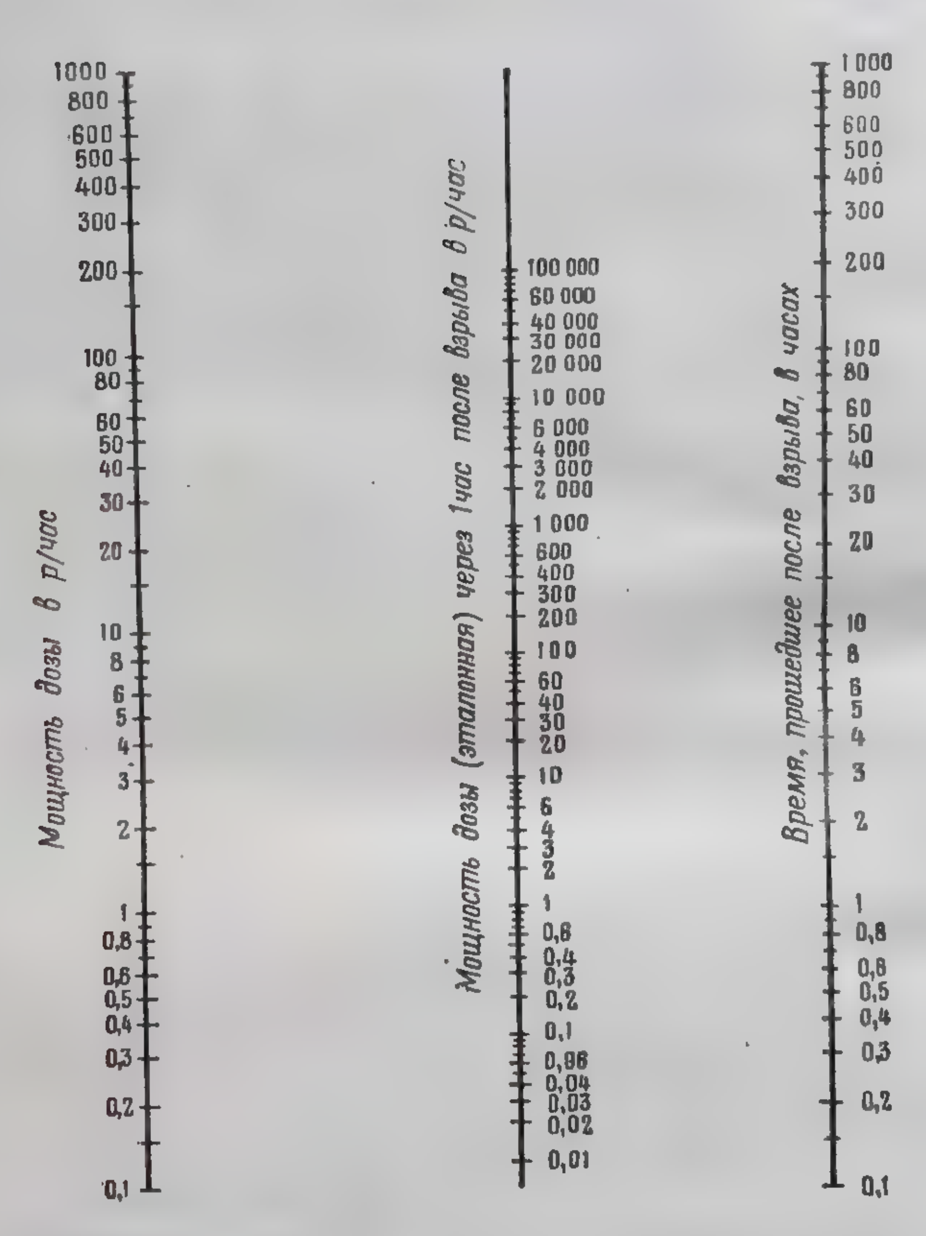


Рис. XII.106. Номограмма для расчета мощности дозы радиации, создаваемой продуктами распада в результате выпадения радиоактивных частиц

Номограмма (рис. XII.106) выражает зависимость между мощностью дозы в любой момент времени после взрыва и эталонной мощностью дозы R_1 (через 1 час после взрыва). Если известна мощность дозы в какой-либо момент времени, то по номограмме можно определить мощность дозы в любой другой момент времени. И, наоборот, может быть определено время, прошедшее после взрыва, в течение которого мощность дозы приобрела определенное значение.

Пример. Дано: в результате выпадения радиоактивных частиц в определенном районе через 6 часов после взрыва мощность дозы радиации составляет 8 *р/час.*

Определить: а) мощность дозы по истечении 24 часов после взрыва;

б) время после взрыва, по истечении которого мощность дозы будет равна 1 *р/час.*

Решение: При помощи линейки или угольника соединяем точку на левой шкале, соответствующую 8 *р/час*, с точкой на правой шкале, соответствующей 6 часам. Прямая линия между этими двумя точками пересечет среднюю шкалу в точке, соответствующей 70 *р/час*; это и есть величина эталонной мощности дозы R_1.

а) Используя линейку, соединяем точку, соответствующую найденному значению эталонной мощности дозы (70 *р/час*), с точкой на правой шкале, соответствующей 24 часам, истекшим после взрыва, и продолжаем линию до пересечения с левой шкалой, на которой определится величина искомой мощности дозы; она составляет 1,5 *р/час.*

б) Прямую линию от точки на левой шкале, соответствующей значению мощности дозы в 1 *р*, через точку на средней шкале, соответствующую значению эталонной мощности дозы в 70 *р/час*, продолжим до пересечения с правой шкалой. Точка пересечения соответствует искомому значению времени после взрыва, равному 34 часам.

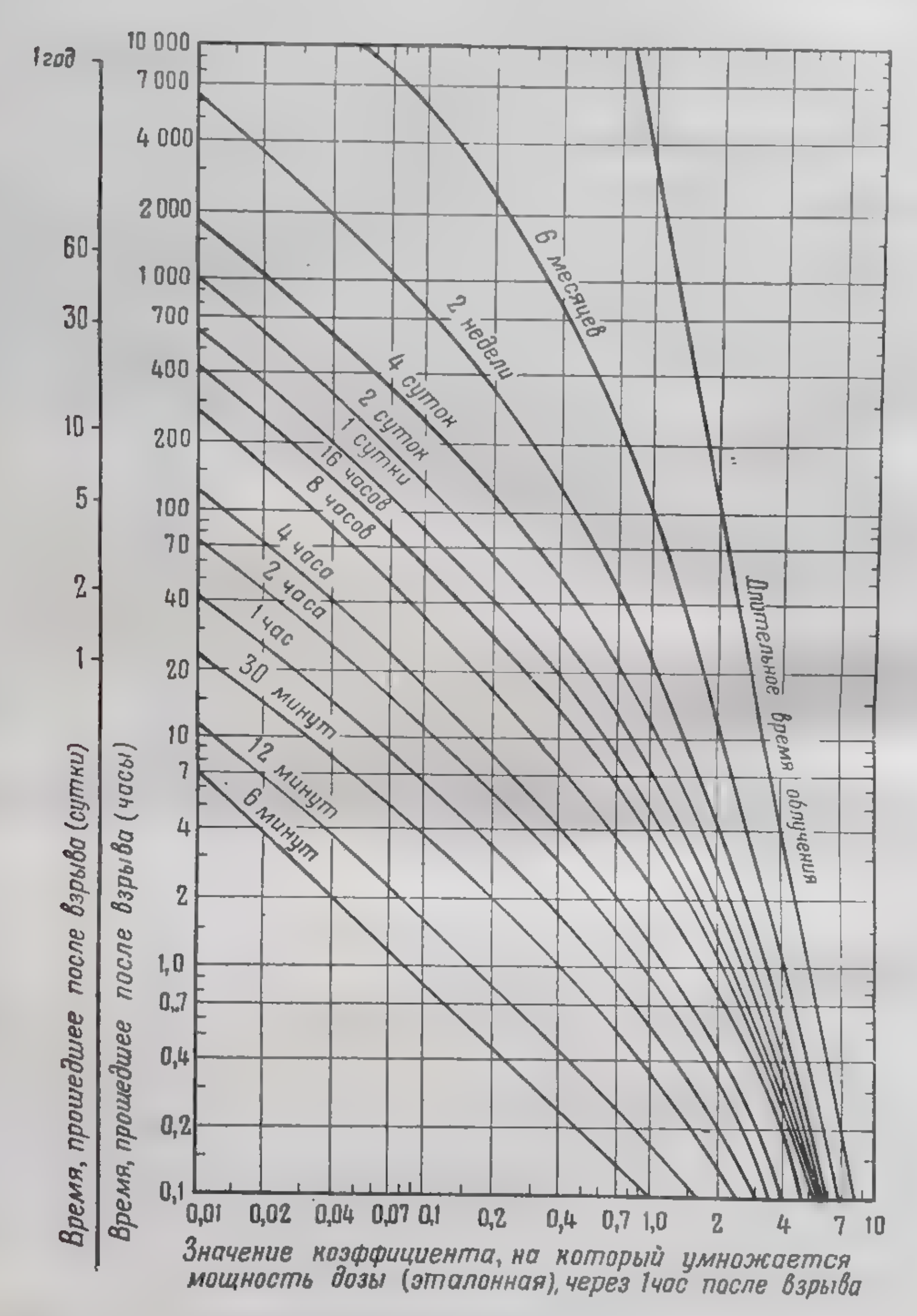


Рис. XII.107. Суммарная доза радиации в районе выпадения радиоактивных частиц, определяемая на основе эталонной мощности дозы (через 1 час после взрыва)

Из графика (рис. XII.107) может быть определена суммарная доза радиации, полученная при выпадении радиоактивных частиц для любого определенного периода пребывания в зараженном районе, если известна мощность дозы по истечении определенного времени после взрыва. И наоборот, может быть определено время начала каких-либо действий в зараженном районе, требующих определенной продолжительности пребывания в нем при заданной величине суммарной дозы радиации.

Пример. Дано: мощность дозы радиации через 4 часа после взрыва составляет 6 *р/час*.

Определить: а) суммарную дозу радиации, которая будет получена в течение 2 часов, по истечении 6 часов после взрыва; б) время после взрыва, по истечении которого могут быть начаты работы, требующие пребывания в зараженном районе в течение 5 часов, при условии, что полученная суммарная доза радиации будет составлять 4 *р*.

Решение: Прежде всего необходимо определить эталонную мощность дозы радиации R_1, для чего, используя график, изображенный на рис. XII.106, соединяем прямой линией точку на левой шкале, соответствующую 6 *р/час*, с точкой на правой шкале, соответствующей 4 часам. Точка пересечения этой прямой со средней шкалой соответствует 32 *р/час*; это и есть значение R_1.

а) На вертикальной оси графика находим точку, соответствующую 6 часам после взрыва, и проводим через нее горизонтальную прямую до пересечения с кривой, соответствующей времени пребывания в зараженном районе, равному 2 часам. От точки пересечения проводим вертикальную линию до горизонтальной оси графика и находим на ней значение коэффициента, на которой следует умножить найденное ранее значение R_1; этот коэффициент равен 0,19. Отсюда искомая суммарная доза радиации составляет

$$0{,}19 \times 32 = 6{,}1 \ р.$$

б) Поскольку заданная суммарная доза радиации составляет 4 *р*, а значение R_1 составляет 32 *р/час*, то коэффициент снижения радиации будет равен 4 : 32 = 0,125. На горизонтальной оси графика находим точку, соответствующую значению 0,125; от этой точки проводим вертикальную линию до пересечения ее с кривой (получаемой интерполяцией), соответствующей времени пребывания в зараженном районе, равному 5 часам. Точку пересечения с этой кривой соединяем горизонтальной прямой с вертикальной осью графика, на которой находим искомое время после взрыва; это время составляет 19 часов.

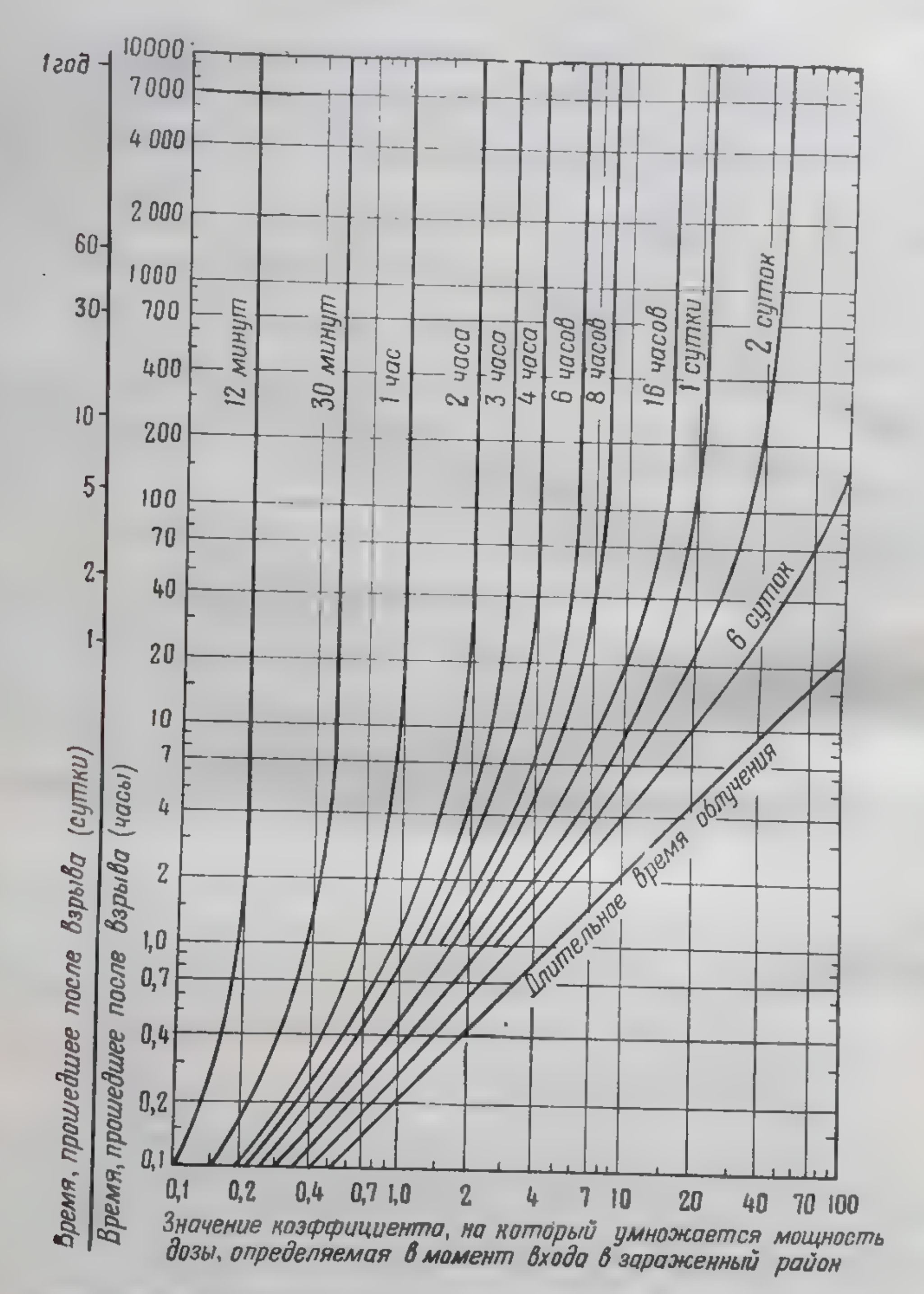


Рис. XII.108. Суммарная доза радиации в районе выпадения радиоактивных частиц, определяемая на основе мощности дозы радиации, устанавливаемой при входе в зараженный район

Из графика (рис. XII.108) может быть определена суммарная доза радиации, полученная при выпадении радиоактивных частиц в течение любого определенного промежутка времени пребывания в зараженном районе, если известна мощность дозы радиации в момент входа в этот район. И наоборот, может быть определено время пребывания в зараженном районе, если заранее установлена допустимая суммарная доза радиации.

Пример. Дано: при входе на зараженный участок через 12 часов после ядерного взрыва мощность дозы составляет 5 *р/час*.

Определить: а) суммарную дозу радиации, полученную при пребывании в зараженном районе в течение 2 часов; б) время пребывания в зараженном районе, в течение которого будет получена суммарная доза радиации, равная 10 *р*.

Решение: а) На вертикальной оси графика находим точку, соответствующую 12 часам, и проводим через нее горизонтальную прямую до пересечения с кривой, соответствующей времени пребывания на зараженном участке, равном 2 часам. От точки пересечения проводим вертикальную линию до горизонтальной оси графика и находим на последней значение коэффициента, на который следует умножить мощность дозы в момент входа на зараженный участок; этот коэффициент равен 1,9. Отсюда искомая суммарная доза радиации составляет:

$$1{,}9 \times 5 = 9{,}5\ р.$$

б) Поскольку суммарная доза радиации составляет 10 *р*, а мощность дозы в момент входа на зараженный участок равна 5 *р/час*, то коэффициент снижения радиации будет равен 10/5=2. На горизонтальной оси графика находим точку, соответствующую значению коэффициента снижения радиации, равному 2; от этой точки проводим вертикальную линию. На вертикальной оси находим точку, соответствующую 12 часам, истекшим после взрыва, и проводим через нее горизонтальную прямую до пересечения с ранее проведенной вертикальной линией. Точка пересечения этих прямых соответствует искомому времени пребывания на зараженном участке, которое в данном случае составляет примерно $2^1/_3$ часа.

определения либо суммарной дозы радиации, полученной за определенное время пребывания на зараженном участке, либо для определения времени, за которое будет получена данная доза радиации. Однако этот расчет можно упростить путем использования графика, показанного на рис. XII.108; при этом отпадает необходимость в определении эталонной мощности дозы радиации (через 1 час после взрыва), но должна быть известна мощность дозы радиации в момент входа на зараженный участок.

XII.109. Если в течение короткого промежутка времени все радиоактивные частицы, выпадающие из радиоактивного облака, достигнут данного района, то для определения возрастания величины суммарной дозы радиации, полученной жителями в зависимости от времени пребывания в данном районе, может быть использован график, изображенный на рис. XII.108. График построен в предположении, что жители не используют каких-либо средств защиты. Предположим, например, что выпадение радиоактивных частиц из радиоактивного облака произошло через 6 часов после взрыва и что мощность дозы радиации через этот промежуток времени составляла R *р/час*, тогда полученная суммарная доза радиации составит $8Rp$ за первые сутки, $11Rp$ за двое суток и $13Rp$ за пять суток.

XII.110. Очевидно, что первые сутки после взрыва являются наиболее опасными с точки зрения облучения остаточной ядерной радиацией, образуемой выпадающими радиоактивными частицами. Хотя приведенные выше данные относятся к частному случаю, т. е. к случаю полного выпадения радиоактивных частиц из радиоактивного облака через 6 часов после взрыва, тем не менее общие выводы, вытекающие из этого, справедливы для всех случаев.

Дозы радиации, которые будут получены в течение первых суток или за двое суток, значительно выше доз, полученных в последующие дни. Следовательно, защита от выпадающих радиоактивных частиц приобретает наибольшее значение на ранних стадиях, наступающих непосредственно вслед за взрывом.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

А-бомба — сокращенное обозначение атомной бомбы.

Альфа-частица — частица, самопроизвольно испускаемая ядрами атомов некоторых радиоактивных элементов. Она идентична с ядрами атомов гелия, имеющими массу в четыре единицы и положительный электрический заряд в две единицы. См. радиоактивность.

Атом — наименьшая частица какого-либо элемента, обладающая свойствами этого элемента. Каждый атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и вращающихся вокруг него отрицательно заряженных электронов в таком количестве, что весь атом оказывается электрически нейтральным (см. элемент, электрон, ядро).

Атомная бомба (или атомное оружие) — ядерный заряд, в котором используется только энергия деления ядер (см. деление, ядерное оружие).

Атомное облако (облако взрыва) — такое название получила смесь горячих газов и дыма, а также пыли и других веществ, образующихся в результате взрыва боеприпаса или втягиваемых с поверхности земли и поднимающихся вверх вслед за огненным шаром, образующимся при взрыве ядерного (атомного) заряда.

Атомный вес — относительный вес атома данного элемента. При определении атомных весов исходной величиной является вес атома кислорода, который принимается равным точно шестнадцати единицам; в этом случае атомный вес самого легкого элемента — водорода равен 1,008. Следовательно, атомный вес любого элемента приблизительно равен весу атома этого элемента, отнесенному к весу атома водорода.

Атомный номер — см. ядро.

Базисная волна — облако, распространяющееся радиально от основания столба, который образуется при подводном и подземном взрывах. Базисная волна, образующаяся при подводном взрыве, представляет собою облако, состоящее из капелек воды, но обладающее свойством текучести, почти как гомогенная жидкость. При подземном взрыве базисная волна состоит из мельчайших твердых частиц; несмотря на это, она обладает текучестью, как жидкость. Рыхлый грунт способствует образованию базисной волны при подземных взрывах.

Бета-частица — заряженная частица весьма малой массы, самопроизвольно испускаемая ядрами атомов некоторых радиоактивных элементов. Подавляющее большинство продуктов деления испускает отрицательные бета-частицы. Физически отрицательно заряженная бета-частица представляет собою электрон, движущийся с большой скоростью (см. электрон, продукты деления, радиоактивность).

БРЭ (биологический рентген-эквивалент) — единица биологической дозы ионизирующей радиации. Число *брэ* равно числу единиц *рад* поглощенной дозы радиации, вызывающей данный биологический эффект, умноженному на число единиц *обэ* относительной биологической эффективности этой радиации (см. *рад* и *обэ*).

Водородная бомба (оружие) — термин, применяемый иногда для обозначения ядерного заряда, в котором часть энергии взрыва выделяется за счет ядерной реакции синтеза (термоядерной реакции) (см. синтез, ядерное оружие, термоядерный).

Воздушный взрыв — взрыв ядерного заряда в воздухе на высоте, при которой расширяющийся огненный шар не касается поверхности земли даже в момент своей максимальной яркости во втором импульсе светового излучения. Типичным воздушным взрывом называется взрыв, происходящий на такой высоте, при которой можно ожидать наибольшие масштабы разрушений в городе средних размеров.

Внутренняя радиация — ядерная реакция (альфа- и бета-частицы, гамма-лучи), исходящая от радиоактивных веществ, имеющихся в организме. Наиболее важным источником этой радиации является йод-131, отлагающийся в щитовидной железе, стронций-90 и плутоний-239, отлагающиеся в костях.

Выпадение — процесс или явление оседания из атомного облака на поверхность земли частиц, зараженных радиоактивными веществами. Этот термин часто применяется также для обозначения самих радиоактивных частиц.

Высота взрыва — высота над поверхностью земли, на которой происходит воздушный взрыв ядерного заряда. Оптимальная высота взрыва для данной цели (или площади) — это высота, взрываясь на которой, ядерный заряд с данным тротиловым эквивалентом, согласно расчетам, произведет желаемое действие на максимальной площади.

Гамма-лучи (излучение) — электромагнитное излучение высокой энергии, исходящее из атомного ядра и сопровождающее многие ядерные реакции, например деление, радиоактивный распад и захват нейтронов. Физически гамма-лучи идентичны рентгеновским лучам высокой энергии, с той лишь разницей, что рентгеновские лучи исходят не из атомного ядра, а образуются другими путями, например при торможении электронов высокой энергии.

Гипоцентр — термин, который иногда применяется для обозначения эпицентра в случаях взрыва под поверхностью земли или воды (см. эпицентр).

Головная ударная волна — волна, образующаяся в результате слияния падающей и отраженной ударных волн взрыва. Этот термин обычно применяется в отношении ударной волны, возникающей в воздухе и отражающейся от поверхности земли. Фронт головной ударной волны почти перпендикулярен отражающей поверхности и слегка выпуклый (наружу). Головную ударную волну иногда называют также фронтом (волной) Маха (см. ударная волна, фронт ударной волны).

Давление отражения — общее давление, внезапно возникающее на поверхности, когда ударная волна переходит из одной среды в другую, например, когда фронт воздушной ударной волны ударяется о поверхность какого-либо препятствия.

Деление — процесс, при котором ядро данного тяжелого элемента расщепляется с образованием ядер (обычно двух) более легких элементов и выделением значительного количества энергии. Наиболее важными делящимися веществами являются уран-235 и плутоний-239.

Дезактивация — удаление (или уменьшение количества) радиоактивных веществ с поверхности земли, построек, предметов или одежды. Дезактивация может быть выполнена путем: а) обработки поверхности с целью полного или частичного удаления радиоактивных веществ, б) покрытия зараженной поверхности другими веществами, ослабляющими излучение. Радиоактивность уменьшается также вследствие естественного распада, если зараженные объекты не используются в течение длительного времени. Радиоактивные вещества, удаленные с поверхности объектов, должны закапываться в землю, выбрасываться в море или в другие места.

Дейтерий — изотоп водорода, обладающий массой в две единицы; его иногда называют тяжелым водородом. Дейтерий может применяться в термоядерных реакциях синтеза для получения энергии (см. синтез, термоядерный).

Скоростной напор (динамическое давление) — давление воздуха, вызванное движущейся за фронтом ударной волны массой воздуха. Оно равно произведению половины плотности воздуха, через который проходит ударная волна, на

квадрат скорости движения частиц воздуха в волне в момент огибания препятствия.

Дифракция — обтекание волнами краев препятствий. В отношении ударной волны, воздействующей на здание, под дифракцией понимается процесс полного охвата его ударной волной. Под нагрузкой обтекания понимается сила, действующая на здание в процессе его охвата ударной волной.

Доза — количество (суммарное) ионизирующей (ядерной) радиации. Термин «доза» часто применяется для обозначения действующей дозы облучения, измеряемой в рентгенах; под дозой облучения подразумевается ионизация, которая может быть осуществлена в воздухе данным количеством радиации. Дозу облучения следует отличать от дозы поглощения, измеряемой в единицах *фрэ*; доза поглощения определяется количеством энергии излучения, поглощаемым одним граммом определенной ткани тела. Отличают также биологическую дозу, измеряемую в единицах *брэ* и являющуюся мерой биологического воздействия облучения (см. *рад. обэ, брэ. фрэ.* рентген).

Дозиметр — прибор, предназначенный для измерения полученной суммарной дозы ионизирующей радиации.

Дозиметрия — теория и практика применения принципов и способов измерения доз радиации. Практически дозиметрия представляет собой использование приборов различных типов для измерения радиации (см. химический дозиметр, фотопленочный дозиметр, рентгенометр).

Дымовой столб — видимый столб дыма, поднимающийся вверх от центра взрыва ядерного боеприпаса. Дымовой столб при воздушном взрыве может подниматься до тропопаузы, т. е. до границы между тропосферой и стратосферой (см. атомное облако).

Естественная радиация — ядерная (или ионизирующая) радиация, которой постоянно облучается человек; она исходит как из веществ, имеющихся в организме, так и из окружающей среды. Основным источником естественной радиации являются имеющиеся в организме калий-40, а также торий, уран и продукты их распада (в том числе радий), содержащиеся в минералах; к естественной радиации относятся и космические лучи.

Законы подобия — математические соотношения, позволяющие определять параметры ядерного взрыва данной мощности как функцию расстояния от центра (или от эпицентра) взрыва при условии, что соответствующий параметр известен как функция от расстояния для определенного взрыва, например для боеприпаса с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* (см. закон кубического корня).

Закон кубического корня — закон подобия, применяемый для определения многих параметров ударной волны. Этот закон позволяет определять величины параметров ударной волны на данном расстоянии и в данный момент при помощи пропорции кубического корня из величины тротилового эквивалента взрыва.

Законы подобия для ударной волны — формулы, позволяющие определять параметры ударной волны (например, избыточное давление, динамическое давление (скоростной напор), время прихода фронта ударной волны, длительность положительной фазы и т. д.) на любом расстоянии от места взрыва определенной мощности. Эти формулы основаны на известной зависимости упомянутых параметров от расстояния для эталонной мощности взрыва (например, с тротиловым эквивалентом 1 тыс. *т* — см. закон кубического корня).

Заражение — выпадение радиоактивных веществ на местности, на поверхности зданий, предметов или на людей после ядерного взрыва. Эти вещества обычно выпадают из атомного облака и представляют собой частицы пыли или другие твердые частицы, на которые осели продукты деления и другие остатки бомбы. Заражение может произойти также вследствие радиоактивности, наведенной нейтронами, освобождаемыми при взрыве (см. продукты взрыва, дезактивация, выпадение, наведенная радиоактивность).

Н-бомба — сокращенное обозначение водородной бомбы (см. водородная бомба).

Избыточное давление — давление сверх атмосферного, вызываемое ударной волной взрыва: оно обычно измеряется в килограммах на кв. сантиметр (*кг/см*²). Характер изменения избыточного давления во времени зависит от энергии взрыва, расстояния до места взрыва и среды, в которой произошел взрыв. **Максимальное избыточное давление** представляет собою наибольшее значение избыточного давления, которое ударная волна имеет обычно в момент прихода в данную точку (см. ударная волна).

Изотопы — разновидности некоторых элементов, обладающие одинаковыми химическими свойствами, но отличающиеся атомным весом (из-за различного числа нейтронов в ядрах атомов) и ядерными свойствами, например радиоактивностью, способностью расщепляться и т. п. Водород имеет три изотопа с атомным весом 1 (водород), 2 (дейтерий), 3 (тритий). Первые два из этих изотопов стабильны (т. е. нерадиоактивны), а третий является радиоактивным изотопом. Оба обычно встречающихся изотопа урана, имеющих атомный вес 235 и 238, являются радиоактивными; они испускают альфа-частицы, но их период полураспада неодинаков. Кроме того, уран-235 подвергается делению под действием нейтронов любой энергии, в то время как уран-238 делится только под действием нейтронов высокой энергии.

Импульс — произведение избыточного давления (или скоростного напора) ударной волны на время, в течение которого это давление действует на данную точку. Точнее, импульс представляет собой интеграл по времени от избыточного (динамического) давления, взятый от момента прихода ударной волны в данную точку до момента, когда избыточное (динамическое) давление снова становится равным нулю.

Интенсивность — количество энергии (любого излучения), падающее на единицу площади (или проходящее через нее), расположенной перпендикулярно пучку излучения, в единицу времени. Интенсивность светового излучения, падающего на данную поверхность в любой момент времени, обычно выражается в калориях на квадратный сантиметр в секунду. В отношении ядерной радиации термин интенсивность иногда применяется (несколько неточно) для обозначения мощности дозы облучения в данной местности, например в рентгенах или миллирентгенах в час.

Ионизирующая радиация — электромагнитное (гамма- и рентгеновские лучи) или корпускулярное излучение (альфа- и бета-частицы, нейтроны и т. п.), способное во время своего прохождения через вещество прямо или косвенно создавать ионы, т. е. электрически заряженные частицы.

Испытания ядерного (атомного) оружия — испытания, проводимые на полигонах с целью получения данных, необходимых для разработки новых и усовершенствования имеющихся ядерных боеприпасов, а также для изучения поражающих факторов ядерных взрывов и их действия. Многие данные, приведенные в настоящей книге, основаны на измерениях и наблюдениях, произведенных в ходе таких испытаний комиссией по атомной энергии США до 1956 г. Некоторые сведения об испытаниях указаны в таблице.

Сводная таблица испытаний

Год	Условное название	Район	Взрывы					
			общее число	воздушных	на башнях	наземные и надводные	подземные	подводные
1945	Тринити	(Нью-Мексико)	1		1			
1946	Кроссроудс	Тихий океан	2	1				1
1948	Сандстоун	То же	3		3			
1951	Рейнджер	Невада	5	5				

Продолжение

Год	Условное название	Район	Взрывы					
			общее число	воздушные	на башнях	наземные и надводные	подземные	подводные
1951	Гринхаус	Тихий океан	4		4			
1951	Бастер	Невада	5	4	1			
1951	Джангл	То же	2			1	1	
1952	Тамблер	„	4	4				
1952	Снапер	„	4		4			
1952	Айви	Тихий океан	2	1		1		
1953	Апшот	Невада	9	2	7			
1953	Нотхоул	То же	2	2				
1954	Касл	Тихий океан						
1955	Типот	Невада	14	3	10		1	
1955	Вигвам	В море	1					1
1956	Редвинг	Тихий океан						

Конденсационное облако — туман, состоящий из мельчайших капелек воды, который на короткое время окружает огненный шар ядерного взрыва, произведенного в сравнительно влажной атмосфере. При расширении воздуха в фазе разрежения ударной волны взрыва температура понижается, в результате чего имеющиеся в воздухе пары воды конденсируются и образуют облако. Конденсационное облако быстро исчезает (как только давление воздуха становится нормальным и он снова нагревается). Это явление аналогично явлению, происходящему в камере Вильсона, поэтому оно иногда называется эффектом камеры Вильсона.

Контактный взрыв — см. наземный (надводный) взрыв.

Коэффициент отражения — отношение общего давления отражения к давлению падающей ударной волны, когда последняя, двигаясь в какой-нибудь среде, ударяется о поверхность другой.

Коэффициент поглощения — число, характеризующее способность данного вещества поглощать излучение определенной энергии. Линейный коэффициент поглощения выражает эту способность, отнесенную к единице толщины, и выражается в обратных единицах длины или толщины ($cм^{-1}$). Массовый коэффициент поглощения равен линейному коэффициенту поглощения, деленному на плотность поглощающего вещества, и является мерой поглощения, отнесенной к единице массы.

Критическая масса — наименьшее количество делящегося вещества, в котором начинает протекать цепная реакция деления. Величина критической массы зависит от природы делящегося вещества и степени его чистоты, характера и толщины отражателей нейтронов, величины давления на заряд и геометрической формы этого заряда. Для того чтобы произошел взрыв, ядерный заряд должен быть сверх критическим, т. е. масса делящегося вещества должна быть больше критической при данных условиях (см. сверхкритическая масса).

Кюри — единица радиоактивности. Она измеряется количеством любого радиоактивного вещества, в котором происходит $3{,}700 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду. Иногда применяется также единица гамма-кюри, определяемая как количество радиоактивного вещества, в котором указанное число распадов в секунду сопровождается испусканием гамма-лучей.

Кривая распада — график зависимости уменьшения активности от времени.

Купол — свод водяных брызг, выбрасываемых в воздух в момент достижения поверхности воды ударной волной подводного ядерного взрыва.

Летальная (смертельная) доза — количество ионизирующей (ядерной) радиации, полученное всей поверхностью тела, являющееся смертельным для человека. Средняя летальная доза — количество радиации, полученное при тех же условиях и вызывающее смерть половины большой группы облученных людей. В настоящее время принято считать (хотя и не всюду), что средняя летальная доза для человека, полученная всей поверхностью тела за несколько часов, составляет 450 рентгенов.

Линейный коэффициент поглощения — см. коэффициент поглощения.

Максимальная допустимая доза — общее количество радиации, которое, как принято считать, здоровый человек может получать ежедневно в течение длительного времени без каких-либо вредных последствий, проявляющихся на протяжении его жизни.

Массовое число — см. ядро.

Массовый коэффициент поглощения — см. коэффициент поглощения.

МЭВ (1 миллион электроновольт) — единица энергии, обычно применяемая в ядерной физике. 1 *Мэв* эквивалентен $1{,}6 \cdot 10^{-6}$ эргам (*э*). При делении каждого ядра урана выделяется приблизительно 200 *Мэв* энергии.

Миллирентген — одна тысячная часть рентгена (см. рентген).

Мощность дозы — количество ионизирующей (ядерной) радиации, которое может получить человек в единицу времени. Доза радиации обычно измеряется рентгенами в час или долями этой величины, например миллирентгенами в час. Доза радиации, как правило, показывает степень радиоактивности в зараженном районе.

Наведенная радиоактивность — радиоактивность, создаваемая в некоторых веществах в результате ядерных реакций, в частности захвата нейтронов, сопровождающегося образованием неустойчивых (радиоактивных) ядер. Радиоактивность, наведенная нейтронами, освобождаемыми при ядерных взрывах, в веществах, содержащих натрий, магний, кремний или алюминий, может быть значительной.

Нагрузка торможения — сила, действующая на какой-нибудь предмет или строение, вызванная скоротечными ветрами, сопровождающими ударную волну. Давление торможения представляет собой произведение динамического давления (скоростного напора) на коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от геометрической формы предмета или строения.

Наземный (надводный) взрыв — взрыв ядерного (атомного) заряда на поверхности земли (воды) или на такой высоте в воздухе, что огненный шар в момент своей наибольшей яркости (во втором импульсе свечения) касается поверхности. Взрыв, при котором центр его располагается непосредственно на поверхности земли (воды), называется контактным или истинным наземным (надводным) взрывом (см. воздушный взрыв).

Нагрузка — сила, действующая на объект. Нагрузка, вызываемая ударной волной, равняется величине избыточного давления, умноженной на площадь, на которую действует это давление.

Начальная ядерная радиация — ядерная радиация (главным образом нейтроны и гамма-лучи), исходящая из огненного шара или облака взрыва в течение первой минуты после ядерного (атомного взрыва). Этот промежуток времени установлен несколько произвольно потому, что в течение одной минуты источник радиации, т. е. продукты деления в атомном облаке, поднимется на такую высоту, что поверхности земли достигает лишь незначительное количество этой радиации (см. остаточная ядерная радиация).

Нейтрон — нейтральная, т. е. не несущая электрического заряда частица, масса которой почти равна единице; нейтроны имеются в ядрах атомов всех элементов, за исключением ядра атома обычного (легкого) водорода. Процесс деления ядер инициируется и поддерживается нейтронами, в то же время при ядерных взрывах освобождается много нейтронов в результате реакций как деления, так и синтеза.

Несущая стена — стена, поддерживающая часть общей массы здания, например систему перекрытий и крыши.

Номинальная атомная бомба — термин, который теперь уже устарел, но ранее применялся для обозначения атомного заряда с тротиловым эквивалентом 20 тыс. *т*. Примерно такой тротиловый эквивалент имели бомбы, сброшенные над японскими городами, и бомбы, испытанные у атолла Бикини в 1946 г.

ОБЭ (относительная биологическая эффективность) — отношение количества единиц *рад* поглощенной дозы радиации гамма-излучения (или рентгеновского излучения) определенной энергии, вызывающего данный биологический эффект, к числу единиц *рад* другого излучения, необходимого для того, чтобы вызвать такой же эффект.

Область Маха (дальняя зона распространения ударной волны) — область, в которой образуется головная ударная волна при данном воздушном ядерном взрыве.

Огненный шар — светящаяся сфера раскаленных газов, которые образуются через несколько миллионных долей секунды после момента ядерного взрыва; немедленно после своего образования она начинает расширяться и охлаждаться. Внешние границы огненного шара резко обозначаются вначале светящимся фронтом ударной волны (в воздухе), а после отрыва последней — самими раскаленными газами (см. отрыв ударной волны).

Огненный шторм — неподвижная огненная масса большого пожара, обычно возникающего в застроенных городских районах. В результате такого пожара образуются движущиеся со всех сторон к центру пожара ветры, которые не позволяют пожару распространяться и в то же время дают новые количества кислорода, усиливающего интенсивность огня.

Остаточная ядерная радиация — ядерная радиация, состоящая в основном из бета-и гамма-излучений и действующая в течение некоторого времени после ядерного взрыва. Эта радиация создается в основном продуктами деления и непрореагировавшей частью заряда взорвавшейся бомбы, а также частично некоторыми веществами почвы и воды, в которых радиоактивность наводится нейтронами (см. выпадение, наведенная радиоактивность, начальная радиация).

Отрыв ударной волны — возникновение условий, при которых фронт воздушной ударной волны отделяется от внешних границ расширяющегося огненного шара ядерного взрыва (см. огненный шар, ударная волна).

Период полураспада — время, в течение которого активность данного радиоактивного вещества в результате естественного распада уменьшается до половины своего первоначального значения. Период полураспада является характерным свойством каждого радиоактивного вещества и не зависит от его количества или состояния. **Биологический период полувыделения** — время, в течение которого количество данного элемента, попавшее в организм (или в какой-нибудь орган), уменьшается до половины своего первоначального значения в результате биологических процессов выделения. **Период половинной эффективности** данного изотопа — это то время, в течение которого поражающее действие находящегося в организме изотопа уменьшается до половины своего первоначального значения как в результате радиоактивного распада, так и в результате биологических процессов выделения.

Подводный взрыв — ядерный взрыв, центр которого располагается ниже поверхности воды.

Подземный взрыв — ядерный взрыв, центр которого располагается ниже поверхности земли.

Полый столб (султан) — полый цилиндр из воды и водяной пыли, выбрасываемый вверх при подводном взрыве ядерного заряда, через который в атмосферу вырываются сильно сжатые раскаленные газы, образовавшиеся при ядерном взрыве. Почти такой же столб, но состоящий из пыли, образуется при подземном взрыве.

Предел видимости (видимость) — расстояние, на котором можно видеть в дневное время большой темный предмет на горизонте. Видимость характеризует прозрачность атмосферы; она изменяется от 80 *км* (для исключительно чистой атмосферы) до нескольких сот метров (плотная дымка или туман).

Пороговый детектор — элемент (или изотоп), превращающийся в радиоактивный в результате захвата нейтронов, энергия которых превышает некоторое пороговое значение, характерное для данного элемента. Пороговые детекторы употребляются для определения нейтронного спектра ядерного взрыва, т. е количества нейтронов с различными значениями энергии.

Проводимость (атмосферная) — доля (или процент) световой энергии, получаемой в данной точке после прохождения светового излучения через атмосферу, от того количества световой энергии, которое было бы получено при условии отсутствия атмосферы.

Продукты деления — общее название сложной смеси веществ, образующихся при делении ядер. Следует отличать продукты деления от прямых продуктов деления или **осколков деления**, непосредственно образующихся при расщеплении ядер данного тяжелого элемента. Ядра атомов данного вещества, например урана-235 или плутония-239, делятся почти 40 различными способами с образованием около 80 различных осколков деления. Осколки деления, будучи радиоактивными, немедленно начинают распадаться с образованием других (дочерних) продуктов; в результате всего этого образуется упомянутая сложная смесь продуктов деления, содержащая около 200 различных изотопов более 30 элементов.

Протон — частица, несущая единицу положительного электричества; масса протона приблизительно равна единице. Физически протон идентичен ядру атома обычного (легкого) водорода. Ядра атомов всех элементов содержат протоны (см. ядро).

РАД — единица измерения дозы поглощенной радиации. Она соответствует выделению 100 эргов энергии в 1 *г* поглощающего материала или живой ткани при поглощении любой ядерной (ионизирующей) радиации.

Радиационная разведка — действия по установлению места и уровня радиоактивного заражения, осуществляемые при помощи дозиметрических приборов, которые дают возможность обнаруживать и измерять ионизирующую радиацию. Лицо, выполняющее радиационную разведку, называется дозиметристом.

Радиоактивность — самопроизвольное испускание ядрами атомов неустойчивых изотопов излучения, главным образом альфа- и бета-частиц, часто сопровождаемое гамма-лучами. В результате этого процесса (радиоактивного распада) данный изотоп превращается в изотоп другого элемента, который может быть (но не обязательно) также радиоактивным. После одного или нескольких последовательных актов радиоактивного распада данный радиоактивный изотоп превращается в конце концов в устойчивый нерадиоактивный конечный продукт.

Радиация — см. ядерная радиация.

Распад (радиоактивный распад) — уменьшение активности радиоактивного вещества с течением времени вследствие самопроизвольного испускания ядрами атомов этого вещества альфа- или бета-частиц, иногда сопровождающееся испусканием гамма-лучей (см. период полураспада, радиоактивность).

Рассеивание — отклонение лучей ядерного или светового излучения от своего первоначального направления в результате столкновения их с атомами, молекулами или другими частицами в воздухе или другой среде, находящейся между источником излучения (например, ядерным взрывом) и точкой, расположенной на некотором расстоянии от этого источника. Явление рассеивания приводит к тому, что радиация (особенно гамма-лучи и нейтроны) достигает данной точки из различных направлений, а не только по прямой линии, соединяющей эту точку с источником излучения.

Рентген — единица дозы гамма- (или рентгеновского) излучения. Рентген кратко определяется как количество гамма- (или рентгеновского) излучения, которое в 0,001293 *г* воздуха создает ионы, несущие одну электростатическую единицу электричества любого знака. Исходя из того количества энергии, которое расходует электрон на образование в воздухе пары разноименно заряженных ионов, подсчитали, что один рентген гамма- (или рентгеновского) излучения соответствует поглощению 87 *э* энергии каждым граммом воздуха.

Рентгенометр (радиометр) — прибор, предназначенный для обнаружения ядерной радиации и измерения ее уровня. Основной частью этих приборов может быть, например, счетчик Гейгера или ионизационная камера.

Продукты взрыва — остатки ядерной (атомной) бомбы после ее взрыва. Продукты взрыва состоят из материала оболочки заряда и других компонентов бомбы, а также из непрореагировавшей части заряда (изотопов урана и плутония) и продуктов деления.

Сверхкритическая масса — количество делящегося вещества, превосходящее критическую массу этого вещества при данных условиях. Для того чтобы энергия деления выделилась быстро и произошел взрыв, масса делящегося вещества (ядерного заряда) должна значительно превосходить критическую (см. критическая масса).

Световое (тепловое) излучение — электромагнитное излучение, испускаемое (в два импульса) огненным шаром вследствие очень высокой температуры последнего; оно в основном состоит из ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных лучей. В начальной стадии взрыва (первый импульс), когда температура огненного шара очень высока, в световом излучении преобладают ультрафиолетовые лучи; во время второго импульса, когда температура огненного шара ниже, в спектре светового излучения преобладают видимые и инфракрасные лучи.

Световой ожог — ожог, вызванный чрезмерным облучением открытых участков тела световым излучением (см. световое излучение).

Синтез — процесс, при котором ядра легких элементов, в частности ядра изотопов водорода (дейтерия и трития), соединяются, образуя ядра более тяжелых элементов, с выделением значительного количества энергии (см. термоядерная реакция).

«Слик» — след движения ударной волны, видимый на сравнительно спокойной поверхности воды в виде быстро увеличивающегося в размерах круга, кажущегося светлее, чем окружающая вода. «Слик» наблюдается, в частности, после подводного взрыва.

Тепловая (световая) энергия — энергия, испускаемая огненным шаром в виде теплового (светового) излучения. Общее количество тепловой энергии, приходящееся на единицу площади на данном расстоянии от места ядерного (атомного) взрыва, принято выражать в калориях на квадратный сантиметр (*кал/см²*) (см. световое излучение).

Термоядерный — определение, применяемое к происходящим при очень высоких температурах процессам слияния (синтеза) легких ядер (например, ядер атомов дейтерия и трития), сопровождающимся выделением энергии. Термоядерной бомбой называется оружие, в котором часть энергии взрыва выделяется в результате ядерной реакции синтеза. Высокая температура, необходимая для инициирования термоядерных процессов, получается при помощи ядерного взрыва, основанного на реакции деления (см. синтез).

Толщина слоя половинного ослабления – толщина слоя данного вещества, необходимая для ослабления падающего на него гамма-излучения до половины его первоначального значения; толщина слоя половинного ослабления

зависит от природы вещества (она приблизительно обратно пропорциональна плотности вещества) и от энергии гамма-излучения.

Тритий — радиоактивный изотоп водорода, масса которого составляет три единицы.

Тройная точка — точка пересечения фронтов падающей, отраженной и головной ударных волн. Высота тройной точки, т. е. высота головной ударной волны, увеличивается с возрастанием расстояния от места взрыва.

Тротиловый эквивалент — мера энергии, освобождаемой при взрыве ядерного (атомного) оружия или при взрыве определенного количества делящегося вещества, выражаемая количеством тротила, при взрыве которого выделилось бы такое же количество энергии. Тротиловый эквивалент обычно измеряется в тысячах тонн или миллионах тонн. Взрыв одной тонны тротила освобождает 10^9 *кал* энергии.

Ударная волна — импульс (или волна) сжатия, непрерывно распространяющийся в окружающей среде (в воздухе, воде или грунте); в начальный момент это сжатие вызывается расширением раскаленных газов, образующихся во время взрыва. Ударная волна в воздухе (воздушная ударная волна) подобна сильному ветру (и она действительно сопровождается им). При прохождении ударной волны отмечаются две фазы ее действия. В первой фазе, называемой фазой сжатия (или фазой положительного давления), давление сначала резко повышается по сравнению с давлением в окружающей среде, затем оно быстро падает и сравнивается с давлением в окружающей среде. При взрыве данной мощности с увеличением расстояния от места взрыва продолжительность фазы сжатия увеличивается, а максимальное давление уменьшается. Во второй фазе, называемой фазой разрежения (или фазой отрицательного давления), давление падает ниже первоначального давления в окружающей среде и затем снова сравнивается с давлением в окружающей среде. Продолжительность фазы разрежения остается почти постоянной на протяжении всего процесса прохождения ударной волны и в несколько раз может превзойти продолжительность фазы сжатия. В фазе разрежения давление по своему значению не отличается существенно от давления в окружающей среде, причем с увеличением расстояния от места взрыва разница между давлениями в ударной волне и окружающей среде уменьшается (см. избыточное давление).

Ударная нагрузка — нагрузка (сила) на какой-либо объект, вызываемая ударной волной взрыва, при сближении с объектом и обтекании его. Ударная нагрузка включает в себя действие избыточного давления (нагрузки обтекания) и скоростного напора (нагрузки торможения).

Фаза разрежения — см. ударная волна.

Фаза сжатия — см. ударная волна.

Фотопленочный дозиметр — небольшая кассета, изготовленная из металла или пластмассы в виде медальона, заряженная рентгенографической (или подобной ей фотографической) пленкой для определения суммарного количества ионизирующей (ядерной) радиации, получаемого человеком.

ФРЭ (Физический рентген-эквивалент) — единица измерения дозы поглощенной радиации. В принципе *фрэ* выражает то количество энергии, которое поглощается одним граммом мягкой ткани при облучении его одним рентгеном гамма- (или рентгеновского) излучения. Считается, что это количество энергии равно 97 *э*, хотя истинное количество этой энергии зависит от некоторых экспериментальных данных, точное влияние которых установить нельзя. Таким образом, *фрэ* стали определять вообще как дозу любого ионизирующего излучения, облучение которой приводит к поглощению 97 *э* энергии каждым граммом мягкой ткани. В отношении ткани единицы *фрэ* и *пдр* почти одинаковы (см. *пдр*, рентген).

Фронт Маха — см. головная ударная волна.

Фронт ударной волны — резкая граница между областью сжатия, вызванного взрывом (в воздухе, воде или грунте), и невозмущенной атмосферой, водой или грунтом. Эта граница создает фронт ударной волны. В случаях подземного взрыва говорят о фронте волны сжатия в грунте.

Химический дозиметр — прибор, предназначенный для определения суммарной дозы радиации. Действие прибора основано на изменении цвета при химических реакциях, происходящих под влиянием радиации.

Экранирование — защитное действие любого материала (или препятствия), который поглощает излучение. Для защиты от светового излучения достаточен слой непрозрачного вещества умеренной толщины, но от ядерной радиации может защитить лишь плотный материал значительной толщины.

Электрон — частица, имеющая весьма малую массу и несущая единицу отрицательного или положительного электрического заряда. Отрицательные электроны, вращающиеся вокруг ядра, имеются в любом атоме; число таких электронов равно числу положительных зарядов (протонов) в данном ядре. Под словом электрон, если нет особых указаний, подразумевается отрицательный электрон. Положительный электрон обычно называется позитроном, а отрицательный иногда называется негатроном (см. бета-частица).

Элемент — одна из определенных, основных разновидностей материи, встречающихся в природе; элементы, каждый в отдельности или в соединении с другими, образуют все известные вещества. В природе существует около девяноста различных элементов; ряд других элементов, в том числе плутоний, были получены искусственным путем как продукты ядерных реакций между естественными элементами.

Эпицентр — точка на поверхности земли или воды, расположенная на вертикали под или над центром взрыва ядерного заряда.

Ядерная радиация — корпускулярное и электромагнитное излучения, испускаемые ядрами атомов при различных ядерных процессах. Наиболее важной ядерной радиацией, испускаемой при ядерных взрывах, являются альфа- и бета-частицы, гамма-лучи и нейтроны. Все ядерные излучения являются ионизирующими, однако ионизирующее излучение не обязательно должно быть ядерным; например, рентгеновские лучи являются ионизирующими, но не ядерными, поскольку они исходят не из атомного ядра (см. ионизирующая радиация).

Ядерное оружие (или бомба) — общее название любого вида оружия, взрыв которого происходит в результате выделения энергии при ядерных реакциях деления, синтеза или того и другого одновременно. Так, атомная и водородная бомбы являются ядерным оружием. Было бы также правильно называть их атомным оружием, поскольку в обоих случаях источником энергии является атомное ядро. Все же уже стало более или менее привычным, хотя и не совсем точным, те устройства, в которых энергия выделяется только в результате реакции деления ядер, называть атомным оружием. Для того чтобы указать на различие между первым видом ядерного устройства и вторым, в котором хотя бы часть энергии выделяется в результате ядерных реакций синтеза (термоядерных реакций) изотопов водорода, этот последний называют водородным оружием.

Ядерное устройство пушечного типа — устройство, в котором два или более куска
делящегося вещества, каждый из которых имеет массу меньше критической,
быстро соединяются, образуя сверхкритическую массу, взрывающуюся в ре-
зультате возникновения в ней незатухающей цепной реакции деления.

Ядро (атомное ядро) — небольшая центральная часть атома, несущая положи-
тельный заряд, в которой сосредоточена почти вся масса атома. За исключе-
нием ядра атома обычного (легкого) водорода, представляющего собой про-
тон, ядра атомов всех элементов содержат как протоны, так и нейтроны.
Число протонов обусловливает общий положительный заряд ядра или атом-

ный номер, который является одинаковым для ядер всех атомов данного элемента. Общее количество нейтронов и протонов называется **массовым числом** и приблизительно равняется массе (или весу) атома. Ядра **изотопов** данного элемента содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов. Таким образом, изотопы имеют один и тот же атомный номер и представляют собой один и тот же элемент, но отличаются между собой массовым числом (массой). Ядерные свойства изотопа данного элемента, например радиоактивность, способность к делению, захват нейтронов и т. д., определяются числом как протонов, так и нейтронов в ядре (см. атом, элемент, изотоп, нейтрон, протон).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Действие ядерного оружия. Перевод с английского

Технический редактор *Срибнис Н. В.* Корректор *Павлова Г. С.*

Сдано в набор 29.1.1959 г. Г-63837 Подписано к печати 25.10.60 г.

Формат бумаги $60 \times 92^{1}/_{16}$ — $36^{3}/_{4}$ печ. л. = 36,75 усл. печ. л. 36,31 уч.-изд. л.

Военное издательство Министерства обороны Союза ССР

Москва, К-9, Тверской бульвар, 18.

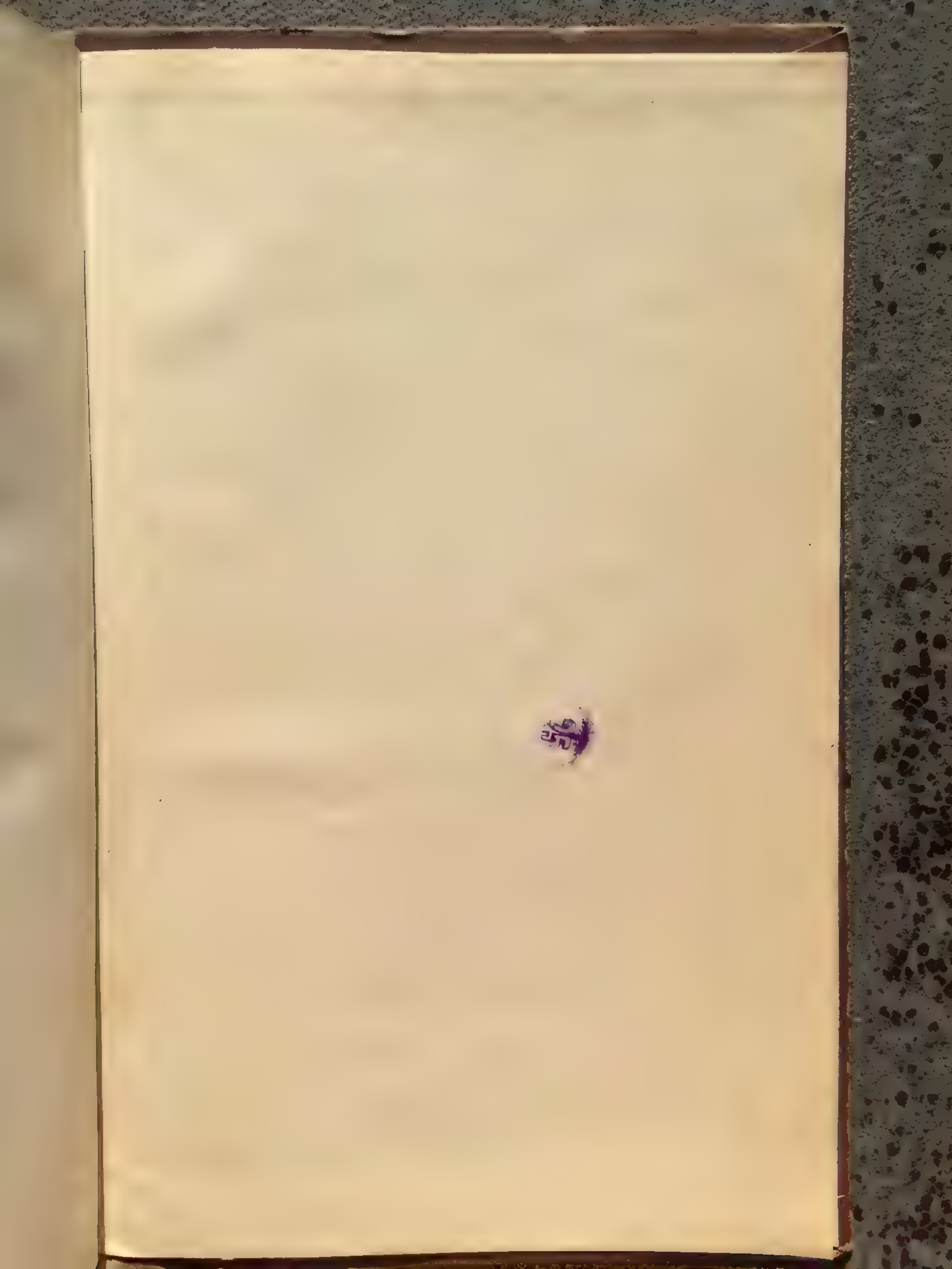
Изд. № 12/611 Зак. № 83

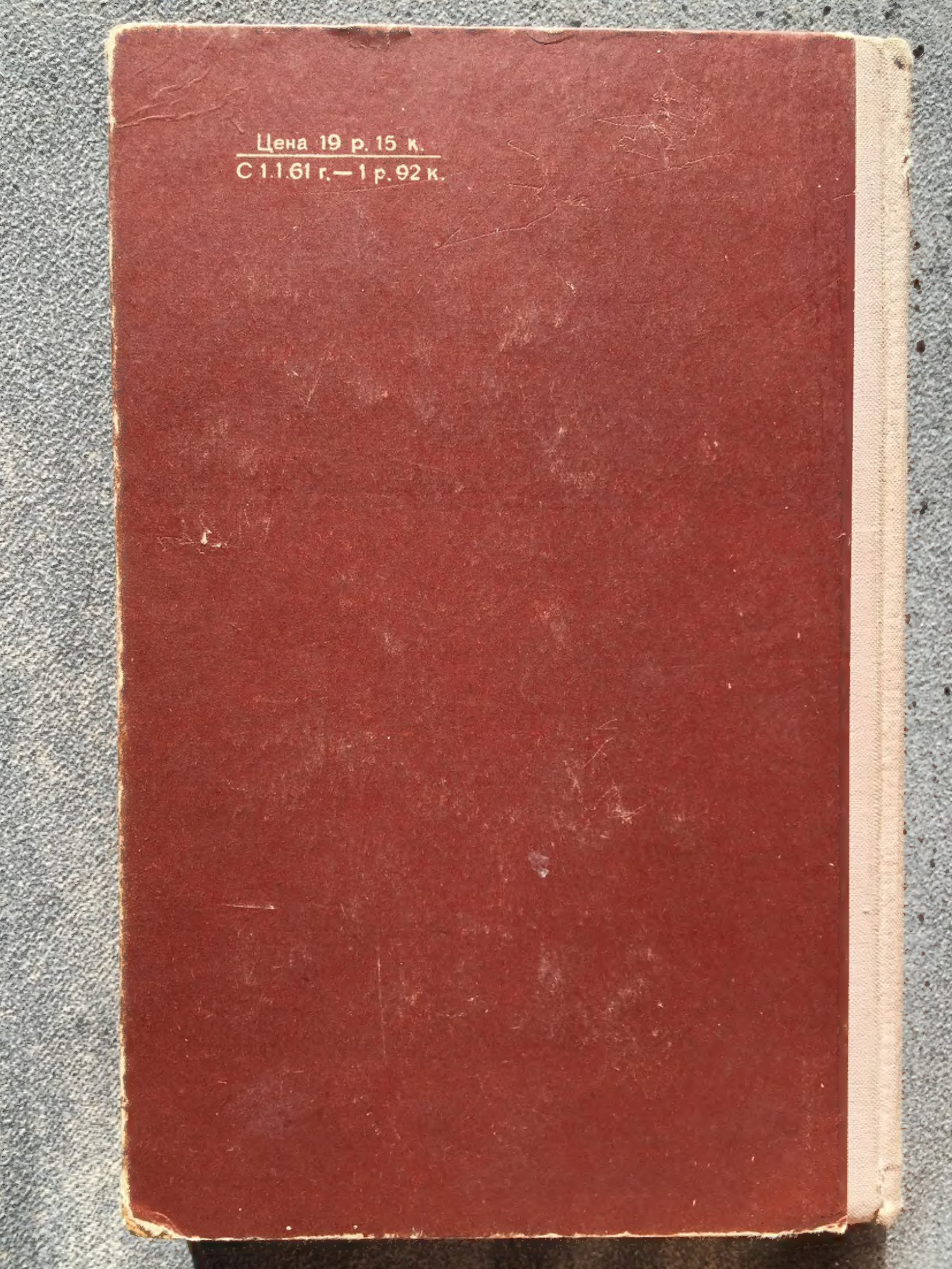
2-я типография Военного издательства Министерства обороны Союза ССР

Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10.

Цена 19 р. 15 к.

С 1.1.61 г. — 1 р. 92 к.




Цена 19 р. 15 к.
С 1.1.61 г.—1 р. 92 к.


ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ